

Procesos MBR y MBR con electrocoagulación (SMEBR): estudio en planta piloto de la influencia de la electrocoagulación en el ensuciamiento de la membrana



Máster Universitario en Gestión Sostenible y
Tecnologías del Agua

Trabajo Fin de Máster

Autor:

Diego Andrey Cortes Naranjo

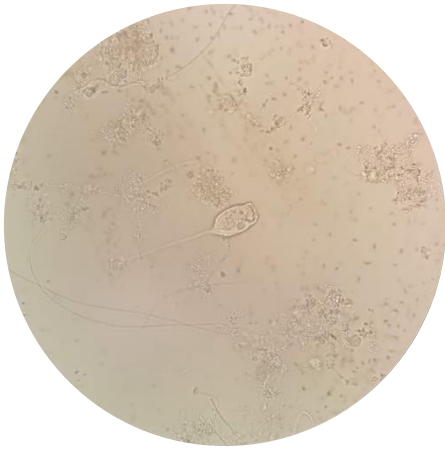
Tutor/es:

Arturo Trapote Jaime / Liuba Domínguez Chabalina / Karen Viviana Mora Cabrera

Julio 2019

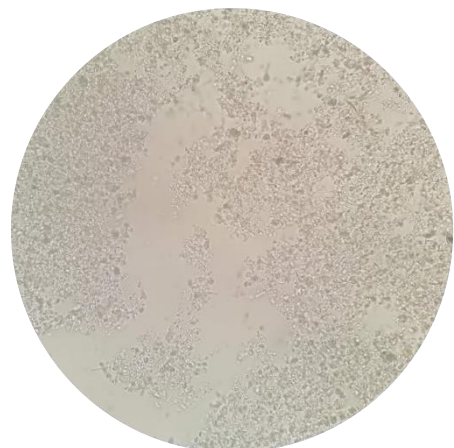


Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante



Estamos en un momento de la historia intelectualmente sobrecogedor. Los científicos están encontrando respuestas a infinidad de profundos interrogantes, pero sobre todo nos están ofreciendo nuevos y turbadores misterios con los que estimular nuestra inquieta curiosidad. Y, creedme, es una lástima perderselo. Una vida sin ciencia es como una vida sin música.

Eduard Punset



Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mi familia por creer en mi y apoyar siempre mi proceso profesional ... por estar, aconsejar e inspirar mi desarrollo personal.

Al Dr. Joaquín Melgarejo por la oportunidad de cursar el Máster y siempre estar atento de mi estadía; así mismo al personal administrativo, académico y del laboratorio del IUACA por compartir sus conocimientos y siempre colabórame con cualquier requerimiento.

Al Dr. Arturo Trapote y Dra. Liuba Chabalina, que como mis tutores me aconsejaron en la experimentación y siempre estuvieron dispuestos a responder cualquier inquietud.

A la investigadora Karen Mora, por permitirme realizar mis practicas con su proyecto doctoral y siempre tener la disposición de enseñarme algo nuevo cada día.

A todas y cada una de las personas que Dios ha puesto en mi camino, gracias por siempre estar al tanto y en cada paso que puedo dar.

Contenido

Índice de Tablas	6
Índice de Figuras	6
Índice de Ecuaciones	7
Abreviaturas	8
Resumen	9
1. Introducción	10
2. Estado del arte	11
2.1 Tecnología UASB	11
2.1.1 Parámetros de diseño y operación	12
2.1.2 Ventajas e inconvenientes	13
2.2 Tecnologías MBR	14
2.2.1 Tipos de Membrana	15
2.2.2 Parámetros de Diseño y Operación	18
2.2.3 Ventajas e Inconvenientes	21
2.2.4 Ensuciamiento de Membranas	23
2.2.5 Sustancias Poliméricas Extracelulares	25
2.3 Electrocoagulación	26
2.3.1 Reacciones químicas del proceso	28
3. Objeto y Justificación de la Investigación	29
3.1 Planteamiento del Problema	29
3.2 Objetivo General	29
3.3 Objetivos Especificos	29
4. Materiales y Métodos	30
4.1 Descripción de la Planta	30
4.1.1 Funcionamiento y operación	31
4.1.2 Membrana Utilizada	34
4.1.3 Limpiezas	36
4.2 Analíticas realizadas	36
4.3 Extracción de EPS's (soluble y enlazada) y Determinación de EPS's mayoritarias (Ácidos Húmicos, Proteínas y Carbohidratos)	41
5. Resultados y Discusión	41
5.2 Determinación de EPS's	47

5.3	Comportamiento de la presión	49
5.4	Aluminio en lodo	49
6.	Conclusiones.....	52
7.	Recomendaciones.....	53
8.	Bibliografía.....	53

Índice de Tablas

Tabla 1. Ventajas y desventajas de reactores UASB	13
Tabla 2. Configuraciones de sistemas MBR	17
Tabla 3. Tipos de materiales utilizados para membranas MBR (Tomado de https://www.thembrsite.com/membrane-materials-used-in-membrane-bioreactor-technology-polymeric-ceramic/)	18
Tabla 4. Ventajas e Inconvenientes de tecnología MBR.	22
Tabla 5. Compuestos en la preparación del Agua Residual Urbana sintética (ARUs)	31
Tabla 6. Corriente en amperios aplicada a cada ciclo de electrocoagulación.....	34
Tabla 7. Frecuencia de analíticas	37
Tabla 8. Ejecución de ciclos de electrocoagulación	42
Tabla 9. Cuantificación de Aluminio después de cada fase de electrocoagulación	50

Índice de Figuras

Figura 1. Esquema general de un reactor UASB (Adhikari & Lohani, 2019).....	11
Figura 2. Comparativa entre sistema de depuración convencional y MBR (Lopez, 2012)	14
Figura 3. Configuraciones de biorreactores de membrana, tomado directamente de (Ures, 2015)	15
Figura 4. Funcionamiento de membranas (Prats Rico, 2019)	16
Figura 5. Flujos en filtración de membranas (Prats Rico, 2019)	16
Figura 6. Desarrollo de plantas MBR de larga escala en el mundo (capacidad de más de 100,000 m ³ /d) (Meng et al., 2017)	23
Figura 7. Representación esquemática de los factores que inciden en el ensuciamiento de la membrana (Aslam, Ahmad, & Kim, 2018)	24
Figura 8. Mecanismos de bio-ensuciamiento en la superficie de las membranas (Aslam et al., 2018).....	24
Figura 9. Esquema de posibles soluciones al ensuciamiento de las membranas (Bagheri & Mirbagheri, 2018).....	27
Figura 10. Esquema del funcionamiento de la electrocoagulación (Restrepo et al., 2006)	28
Figura 11. Fotografía de la planta híbrida.....	30
Figura 12. Esquema de planta híbrida	32
Figura 13. (a) vista superior del sistema SMEBR (b) sistema experimental de SMEBR (Bani-Melhem & Elektorowicz, 2011)	33
Figura 14. Montaje de chapas de electrocoagulación a membrana.....	33
Figura 15. Regulador de voltaje empleado para la electrocoagulación.	34
Figura 16. Estado de membrana después de una serie de electrocoagulación.....	36
Figura 17. Equipos de medición de pH, Conductividad y potencial redox	38
Figura 18. (a) estufa (b) mufla.....	38
Figura 19. Viscosímetro	39
Figura 20. Materiales para prueba de filtrabilidad	40
Figura 21. (a) termoreactores, (b) espectrofotómetro.....	40
Figura 22. Comportamiento de pH y Conductividad	42

Figura 23. Relación SS y SSV	43
Figura 24. Viscosidad del reactor aerobio	44
Figura 25. Eliminación de DQO en la planta híbrida	45
Figura 26. Eliminación de Nitrógeno Total	46
Figura 27. Eliminación de Fosforo Total	46
Figura 28. (a) EPS Solubles Totales en cada fase de electrocoagulación, (b) Porcentaje de Proteínas, Carbohidratos y Ácidos Húmicos en las EPS Solubles Totales	47
Figura 29. EPS Enlazadas Totales en cada fase de electrocoagulación, (b) Porcentaje de Proteínas, Carbohidratos y Ácidos Húmicos en las EPS Enlazadas Totales	48
Figura 30. Presión Transmembrana en cada ciclo de electrocoagulación	49
Figura 31. Esquema de implementación de planta híbrida UASB + SMEBR para industrias y pequeñas poblaciones	51

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Calculo de la Carga Orgánica Volumétrica	12
Ecuación 2. Cálculo de Velocidad Ascensional	12
Ecuación 3. Calculo de Tiempo de Retención Hidráulico	12
Ecuación 4. Carga Hidráulica o Flujo	18
Ecuación 5. Calculo de PTM en filtración directa de membranas	19
Ecuación 6. Calculo de PTM en filtración tangencial de membranas	19
Ecuación 7. Cálculo de permeabilidad (K)	19
Ecuación 8. Calculo de la Resistencia a la Filtración de membranas	20
Ecuación 9. Calculo de Edad del Fango	20
Ecuación 10. Calculo del caudal de purga	21

Abreviaturas

MBRs	Biorreactores de Membrana
MLSS	Sólidos en suspensión en el Licor Mezcla
DQO	Demanda Química de Oxígeno
SS	Sólidos en Suspensión
TRH	Tiempo de Retención Hidráulica
UF	Ultrafiltración
CH	Carga Hidráulica
Sm	Superficie de la Membrana
Y	Conversión
R	Rechazo
K	Permeabilidad
RF	Resistencia a la Filtración
μ	Viscosidad del Fluido
EPS	Extracellular Polymeric Substances
E	Edad del Fango
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
V	Volumen del Reactor
SSVLM	Sólidos en suspensión volátiles en el licor mezcla
TRH	Tiempo de Retención Hidráulico
TRC	Tiempo de Retención Celular
PTM	Presión Transmembrana
ARUs	Aguas Residuales Urbanas sintética
SMEBR	Submerged Membrane Electrobioreactor

Resumen

La investigación realizada en el presente trabajo forma parte del Proyecto “ Eliminación de contaminantes emergentes mediante procesos anaerobios y aerobios en serie y tratamientos complementarios: sistema combinado UASB+SMEBR+O₃/AC” del Ministerio de Economía y Competitividad, con referencia CTM2016-76910-R. Se ha desarrollado en las instalaciones del Instituto del Agua y las Ciencias Ambientales de la Universidad de Alicante, en cuyo laboratorio se encuentra ubicada la planta piloto objeto de estudio.

Los sistemas híbridos de tratamiento de aguas residuales son una combinación de operaciones unitarias unidas que permiten la eliminación de materia orgánica, nutrientes y contaminantes remanentes en el agua; el sistema UASB + SMEBR permite la asociación de una operación biológica anaerobia de digestión y otro con una membrana sumergida con un sistema electrocoagulador en una operación biológica aerobia de digestión; los afluentes son de alta calidad ya que pasan por una membrana de ultrafiltración la cual retiene virus, partículas en suspensión, macromoléculas y permite el fraccionamiento de proteínas.

En los procesos MBR existe un problema que reduce su potencial de aplicación en la depuración de aguas residuales urbanas e industriales, el ensuciamiento de la membrana, este conlleva a sobrecostos en limpiezas y cambio de membranas como la reducción de la eficiencia de la operación de filtración, por ello el objetivo de esta investigación es determinar la influencia de un sistema acoplado de electrocoagulación al MBR, que reduzca el ensuciamiento de las membranas en un sistema alimentado con un afluente sintético con una carga aproximada de 800 mg/L de materia orgánica.

Se han evaluado distintos parámetros de control del sistema completo como pH, Conductividad, DQO, Fósforo, y Nitrógeno; en el caso del pH se maneja en rangos de neutralidad (6,5 a 8) y la conductividad 1000 a 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en cuanto a materia orgánica logra reducir en más del 90% la Materia Orgánica, más del 95% el Fosforo y un 33% de Nitrógeno Total.

La reducción de las EPS en sus fases soluble y enlazada con el sistema SMEBR fue del 25% y 47% respectivamente para la densidad de 5 A/m^2 , y con la densidad de 10 A/m^2 fue de 19 y 32%, siendo así esta última la más efectiva en la reducción de estas sustancias celulares. En términos de ensuciamiento de la membrana, la densidad de corriente que tuvo una eficiencia mayor fue la de 5 A/m^2 con una reducción de 73% en la presión registrada en condiciones normales; a diferencia de la intensidad de 10 A/m^2 que registro solo un 57% de eficiencia en la reducción de la PTM.

Para efectos de la presente investigación y con el fin de que la terminología sea de fácil búsqueda y comprensión por la comunidad científica, se utilizan las abreviaturas en inglés de la gran mayoría de palabras empleadas.

1. Introducción

La depuración de las aguas residuales bien sea urbanas o industriales, integrada a la gestión de cuencas en un territorio constituye en gran medida el nivel de desarrollo de una comunidad, su estado de bienestar y su interacción con el recurso natural, que provee desde alimentación hasta servicios de recreación. Los primeros asentamientos humanos se realizaban cerca de fuentes superficiales dulces, bien sea ríos o lagos, pero a medida que los asentamientos crecieron, también era creciente la necesidad de buscar otras fuentes de agua para abarcar más territorio, es entonces donde surge el descubrimiento de nuevas fuentes, como el agua subterránea, de donde se tienen registro de pozos de extracción desde la edad media (López, Fornés, Ramos, & Villarroya, 2009). Es de resaltar que los sistemas de distribución o acueductos fueron mejorando notablemente, como las redes de distribución de bambú utilizadas por los orientales hasta las grandes acequias producidas por los Romanos, las cuales fueron fundamentales en el desarrollo estructuras venideras.

Con los sistemas de abastecimiento solucionados y fuentes suficientes en aquellas épocas, surge el cuestionamiento, ¿Qué pasa con las aguas que se utilizan? La primera instalación de saneamiento data de 4000 a.C en Babilonia, donde las aguas negras eran baldeadas y transportadas por medio de tuberías de arcilla a pozos negros, pero estos no cubren las necesidades sanitarias que imperan de aguas de desperdicio; con el crecimiento de la industria y la creación de nuevos productos la contaminación del agua se vuelve un problema mayor para las personas, siendo fuente de enfermedades, y para los ecosistemas alterando el ciclo natural a tal punto de afectar la resiliencia del mismo. En el siglo XX, la depuración de las aguas da un salto y se implementan límites de vertido a los cuerpos superficiales, pero en el año 1912 a través de la “Royal Commission on Sewage Disposal” se fijaron las normas y ensayos que debían caracterizar las estaciones depuradoras; fue a partir de este año, las principales ciudades europeas implementaron estaciones depuradoras para la gestión de sus aguas residuales (Molinos-Senante, Hernández Sancho, & Sala Garrido, 2012).

En la actualidad, la mayoría de los países cuentan con estaciones de depuración de agua residual urbana y las industrias realizan el tratamiento de sus efluentes dependiendo del proceso realizado para retornar el agua en las mejores condiciones al medio natural. No obstante, esta no es una situación generalizada en el mundo, existen países donde las redes de abastecimiento no son suficientes y las redes de alcantarillado no proporcionan los niveles de seguridad sanitaria para dichos desechos, generando brotes de enfermedades en la población. Desde que los procesos de industrialización se hicieron mas agudos, surgieron nuevos materiales que nos permiten, en cuanto a lo que el agua se refiere, separar los solutos presentes en la disolución, separar material en suspensión, remover sustancias inorgánicas del agua entre otras teniendo en cuenta el funcionamiento de los sistemas celulares de la naturaleza. Las membranas fueron utilizadas en la desalación de agua de mar y en tratamientos avanzados como terciarios de tratamientos convencionales pero debido a su alto coste su implementación y mantenimiento, adicional a la falta de conocimiento de sus adecuados parámetros de operación, hacían que esta tecnología no tuviera el gran impacto en el tratamiento de aguas residuales.

2. Estado del arte

Este apartado contiene los principales fundamentos en los cuales se desarrolla el trabajo.

2.1 Tecnología UASB

Los reactores Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) tuvieron sus primeras apariciones gracias al profesor Gatze Lettinga y sus colaboradores en la Universidad de Wageningen (Holanda) en los años 70, y supuso un importante paso adelante en lo relativo al tratamiento anaerobio de residuos orgánicos de alta carga (Moya Llamas, 2018)

Este tipo de reactores son diseñados especialmente para influentes con una alta carga orgánica como industrias cerveceras, agroalimentarias etc., donde se mantienen amplios tiempos de retención celular, altas concentraciones de biomasa activa, y a su vez manteniendo bajos tiempos de retención hidráulica. Este tipo de reactor cuenta con manto de lodo activo compuesto por microorganismos anaerobios, la entrada del agua residual se realiza por la parte inferior del reactor lo que facilita la homogenización y a su vez el paso por diferentes estratos del lecho bacteriano, este paso es el que permite el tratamiento del influente; este tipo de tratamiento consta de una serie de separadores de fase líquida, sólida y gaseosa permitiendo el aprovechamiento del gas generado y a su vez la decantación de los sólidos del permeado los cuales se reincorporan al lecho bacteriano, lo que lo convierte en un proceso muy completo (Adhikari & Lohani, 2019; Mahmoud, Zeeman, Gijzen, & Lettinga, 2004; Moya Llamas, 2018). En la figura 1, se puede ver un esquema general del proceso.

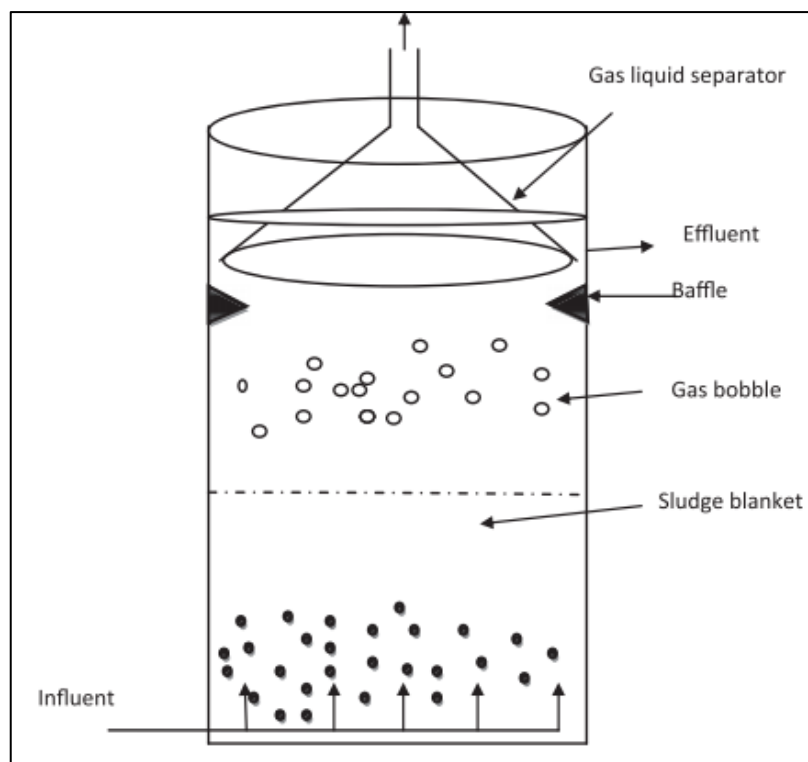


Figura 1. Esquema general de un reactor UASB (Adhikari & Lohani, 2019)

2.1.1 Parámetros de diseño y operación

Este tipo de reactores es el mejor y mas usado como sistema de tratamiento anaerobio para las aguas residuales; su uso es popular en países tropicales debido a las necesidades de temperatura. Existen múltiples procesos físicos, químicos y biológicos que se llevan a cabo dentro del reactor, los relacionados con la concentración, cargas, tamaño y distribución de las partículas) y las características del manto de fangos (EPS, cargas y sostenimiento del lodo), pero los que influyen directamente en el funcionamiento del reactor son los siguientes¹:

- **Carga Orgánica Volumétrica:** La carga orgánica es el parámetro que indica la capacidad de conversión metanogénica de los reactores UASB y está directamente relacionada con la cantidad de biomasa viable retenida, con la actividad metanogénica específica del lodo acumulado y con el denominado factor de contacto (fc).

$$COV\left(\frac{kgDQO}{m^3.d}\right) = \frac{C}{TRH}$$

Ecuación 1. Cálculo de la Carga Orgánica Volumétrica

Generalmente se sitúa entre 35-40 kg SSV/m³ para este tipo de reactores

- **Velocidad ascensional:** La velocidad ascensional del líquido (expresada en m/h) es la relación entre el caudal influente y el área transversal del reactor. Este parámetro se relaciona con la granulometría y determina el adecuado tiempo de contacto de lodo con el influente, además a un determinado TRH dado la máxima velocidad ascensional determinará la relación altura/sección requerida para el buen funcionamiento del reactor.

$$V_{asc}\left(\frac{m}{h}\right) = \frac{Q_{inf}}{A}$$

Ecuación 2. Cálculo de Velocidad Ascensional

- **Tiempo de retención hidráulica (THR):** Esta directamente ligado a la velocidad ascensional y limitado por la carga hidráulica aplicada. Para este tipo de reactores los tiempos son relativamente bajos.

$$TRH(h) = \frac{V}{Q_{inf}}$$

Ecuación 3. Cálculo de Tiempo de Retención Hidráulico

- **Temperatura:** Las bacterias metanogénicas tienen necesidades especiales de temperatura para estar estables en el reactor, a pesar de que el proceso de degradación anaerobia puede tener lugar en todos los rangos de temperatura

¹ Información tomada de (Mahmoud et al., 2004; Moya Llamas, 2018)

(psicrófilo, mesófilo y termófilo), los procesos de digestión anaerobia se desarrollan a una temperatura óptima situada entre 30 y 35°C

2.1.2 Ventajas e inconvenientes

Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)	
<u>Ventajas</u>	<u>Inconvenientes</u>
Eficiente producción de biogás y elevadas tasas de conversión de metano <ul style="list-style-type: none"> Es un proceso altamente efectivo en el cual se puede aprovechar un subproducto de la depuración del agua 	Altos periodos de siembra de lodo <ul style="list-style-type: none"> En ocasiones puede tomar hasta 12 meses, dependiendo de las características del influente
Consumo energético <ul style="list-style-type: none"> Es bajo ya que no requiere de un proceso de agitación mecánico, además los lodos pueden permanecer por largos periodos de tiempo sin alimentación 	Procesos sensibles a cambios en la composición del influente <ul style="list-style-type: none"> El lecho bacteriano cambia fácilmente ante cualquier cambio en la concentración y composición de la alimentación Altamente sensible a compuestos tóxicos
Proceso compacto <ul style="list-style-type: none"> La fermentación ácida y metánica, así como la sedimentación tienen lugar en el mismo tanque, por lo cual las plantas son muy compactas. 	Reducción de bacterias patógenas <ul style="list-style-type: none"> Es baja en comparación a procesos aerobios
Construcción en pequeños espacios <ul style="list-style-type: none"> Aunque la construcción de la obra civil es sencilla, se necesita especial cuidado en los parámetros de control para mantener el proceso. 	Mantenimiento <ul style="list-style-type: none"> Se requiere una operación optima y de un buen conocimiento del proceso bacteriano para mantener el proceso
Nota: Información tomada y adaptada de (Adhikari & Lohani, 2019; Mahmoud et al., 2004; Moya Llamas, 2018)	

Tabla 1. Ventajas y desventajas de reactores UASB

2.2 Tecnologías MBR

Los biorreactores de membrana (Membrane Bio-Reactor, MBR) son una tecnología emergente de los años 70, se implementó a finales de esta década en Estados Unidos y a principios de la década de los 80 en Japón y Sudáfrica. Inicio su comercialización en pequeñas aplicaciones como el tratamiento de aguas residuales a bordo de buques, lixiviados de vertedero o efluentes de alta carga industrial (Del Hombre Bueno, 2012). En los MBR's, el biorreactor y la membrana no pueden ser considerados como operaciones de unidades separadas, ya que interactúan de varias maneras, estos necesitan ser considerados como reactores híbridos (Drews & Kraume, 2005).

El sistema convencional de tratamiento de agua residual por fangos activos consiste en la degradación biológica de materia orgánica en condiciones aeróbicas por medio de difusores de aire o sistemas mecánicos, en este reactor la biomasa es digerida por los microorganismos, el agua ya depurada es separada del licor mezcla por medio de decantadores y la biomasa en exceso se mantiene en un ciclo de recirculación para mantener concentración de biomasa en el reactor. La base la tecnología de tratamiento MBR del agua residual es la misma que el sistema convencional, pero se elimina el proceso de decantación por una filtración a través de una membrana y dependiendo de las características del agua de ingreso se puede considerar como un tratamiento terciario (Gómez Silván, 2012). El esquema comparativo de los dos procesos se puede ver en la figura 2.

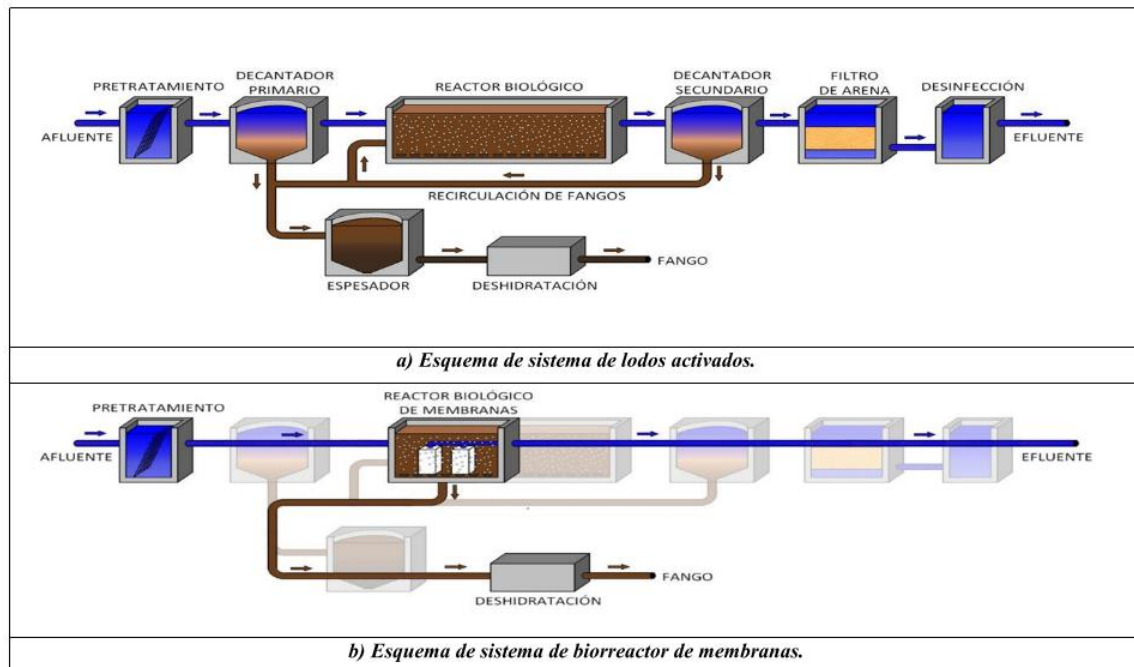


Figura 2. Comparativa entre sistema de depuración convencional y MBR (Lopez, 2012)

Las configuraciones de los sistemas MBR pueden ir desde membranas externas con flujo cruzado, en el cual el licor mezcla es bombeado directamente al interior de la membrana donde se produce la separación por filtración del líquido depurado; membranas sumergidas

externas donde el licor mezcla es bombeado a una unidad exterior denominada deposito de membrana en donde se realiza la separación del liquido depurado y por ultimo esta la configuración de membranas sumergidas internas donde los módulos de membrana se encuentra en el licor mezcla, esta ultima es el sistema utilizado para la presente investigación. En la figura 3 se puede ver los esquemas de las distintas configuraciones de MBR.

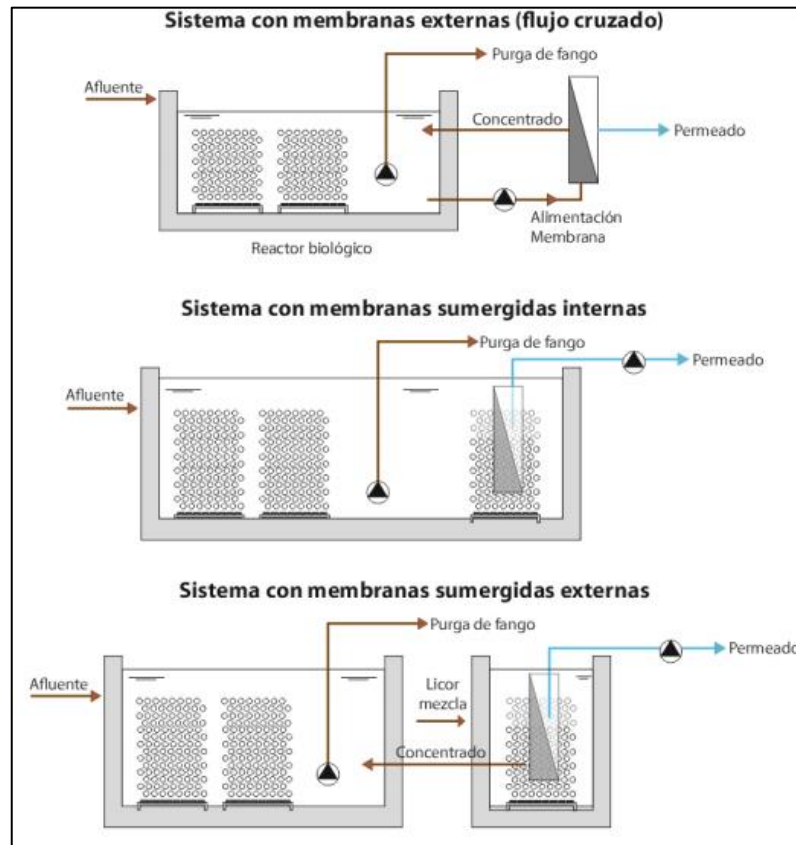


Figura 3. Configuraciones de biorreactores de membrana, tomado directamente de (Ures, 2015)

2.2.1 Tipos de Membrana

Las membranas son barreras físicas semipermeables que se disponen entre dos fases separándolas e impidiendo su contacto, pero que permiten el movimiento de las moléculas a través de ellas de forma selectiva. Son semipermeables ya que permiten el paso de algunos componentes presentes en la corriente de entrada (alimento) y dificulta o impide el paso de otros a la corriente de salida (permeado) (Del Hombre Bueno, 2012; Vásquez, 2015).

El funcionamiento de las membranas se basa en una separación física, donde un influente contaminado es separado en dos corrientes, la primera por diferencial de presión ejercida que atraviesa la membrana, permeado, y otra que no puede pasar la membrana, rechazo, como se puede ver esquemáticamente en la figura 4. Este proceso permite que la membrana semipermeable retenga los coloides y contaminantes presentes en el agua.

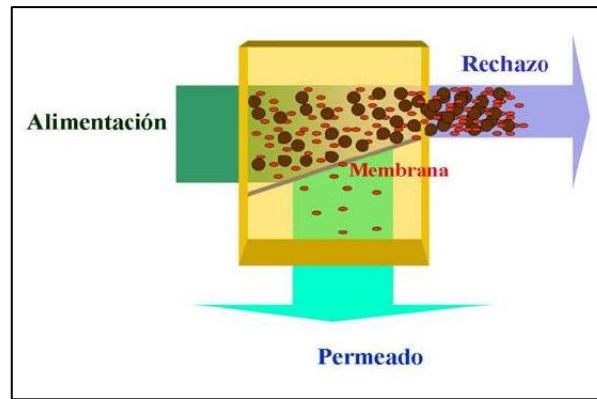


Figura 4. Funcionamiento de membranas (Prats Rico, 2019)

Las membranas más utilizadas en procesos de MBR son de ultrafiltración (UF, tamaño de poro entre 0,005 y 0,1 μm) las cuales funcionan a un diferencial de presión de 1 a 10 bar o de Microfiltración (MF, tamaño de poro entre 0,1 y 1 μm) las cuales funcionan a un diferencial de presión de 0,1 a 5 bar (Vásquez, 2015). Las aplicaciones varían dependiendo del grado de contaminación y las características del agua residual, estas tienen la posibilidad de, en caso de la microfiltración retener materia en suspensión, sólidos moleculares de gran tamaño y virus, y en el caso de la ultrafiltración retener macromoléculas, materia coloidal, virus, proteínas, pectinas (Arévalo et al., 2009).

La manera como se realiza la filtración en las membranas mediante el diferencial de presión previamente descrito para cada tipo de membrana puede ser, perpendicular o transversal. En la figura 5 se pueden ver los dos tipos de procesos

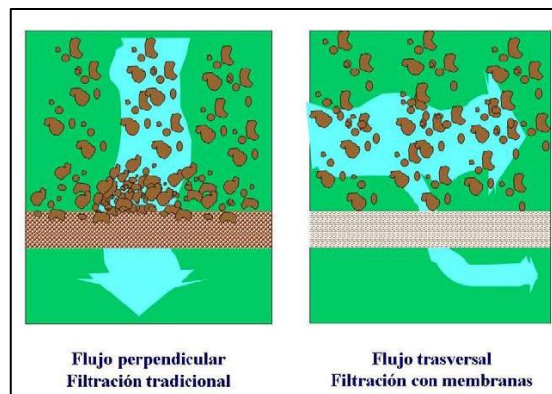


Figura 5. Flujos en filtración de membranas (Prats Rico, 2019)

Las distintas configuraciones de las membranas en sistemas MBR se denominan módulos, estos están compuestos de las membranas, estructuras de soporte de presión, puertos de entrada de la alimentación, distribuidores de caudal, puntos de salida del permeado y del rechazo, se pueden ver los tipos más utilizados en la tabla 2. En la tabla 3, se puede observar los diferentes tipos de materiales utilizados en la fabricación de membranas utilizadas en sistemas MBR.

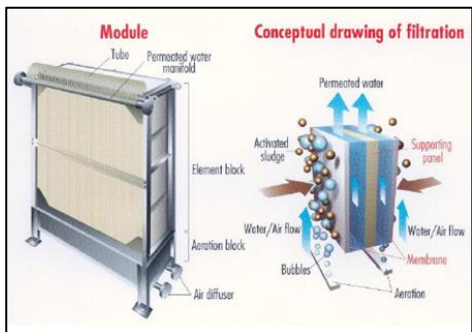
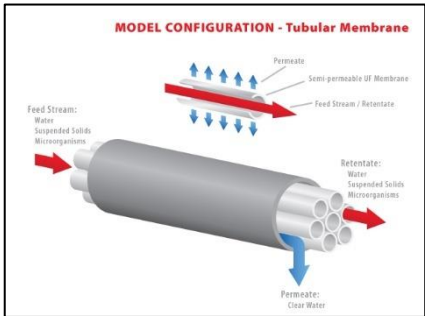
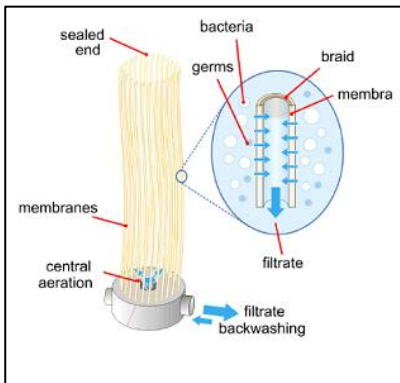
Diferentes configuraciones para tratamiento de agua con sistemas MBR	
<u>Tipo de Modulo</u>	
Modulo placa bastidor	 <p>Tomado de: http://aguasindustriales.es/tag/membrana-plana/</p>
Tubular	 <p>Tomado de: https://www.aigues.net/category/general-es/page/2/</p>
Capilar o Fibra Hueca	 <p>Tomado de: http://aguasindustriales.es/tag/membrana-plana/</p>

Tabla 2. Configuraciones de sistemas MBR

Materiales de membranas usadas en tecnología MBR			
<u>Materiales Orgánicos (Poliméricos)</u>		<u>Materiales Inorgánicos (Cerámicos)</u>	
<i>Polyacrilonitrilo</i>	PAN	<i>Oxido de aluminio</i>	Al ₂ O ₃
<i>Polietileno de alta densidad</i>	(HD)PE	<i>Carburo de silicio</i>	SiC
<i>Polietilsulfona</i>	PES	<i>Dioxido de titanio</i>	TiO ₂
<i>Polisulfona</i>	PS	<i>Dioxido de zirconio</i>	
<i>Politetrafluoroetileno</i>	PTFE		
<i>Difluoruro de polivinilidina</i>	PVDF		

Tabla 3. Tipos de materiales utilizados para membranas MBR (Tomado de <https://www.thembrsite.com/membrane-materials-used-in-membrane-bioreactor-technology-polymeric-ceramic/>)

2.2.2 Parámetros de Diseño y Operación

Los principales parámetros para considerar en sistemas MBR son:

- Carga hidráulica: También denominado flujo, se define como el caudal filtrado en relación con la superficie de la membrana.

$$CH = \frac{Qp}{Sm}$$

Ecuación 4. Carga Hidráulica o Flujo

Donde:

CH: flujo o carga hidráulica (m³/m²·h)

Qp: caudal de permeado (m³/h)

Sm: superficie de la membrana (m²)

Unidades= LMH (l·m²·h⁻¹).

- Presión transmembrana: La presión transmembrana (PTM), es la presión existente entre las dos caras de la membrana, es decir el gradiente que permite el flujo de a través de la membrana. Existen dos tipos de presión, una es la filtración directa que es que realiza la filtración en dirección normal de la membrana, en esta el rechazo queda retenido en el lado donde se realiza la alimentación, lo cual provoca un aumento en la concentración del rechazo con el tiempo (Vásquez, 2015), esta se calcula según la ecuación 6.

$$PTM = Pa - Pp$$

Ecuación 5. Cálculo de PTM en filtración directa de membranas

Donde:

Pa: Presión de alimento (bar)

Pp: Presión de permeado (bar)

Existe otro tipo de PTM la cual es producto de la filtración tangencial, en donde se realiza la alimentación en dirección tangente de la membrana, a un determinado diferencial de la presión, en estas las sustancias retenidas por la membrana son sacadas del sistema por la corriente de rechazo. Esta se calcula según la ecuación 3.

$$PTM = \frac{Pa - Pr}{Patm}$$

Ecuación 6. Cálculo de PTM en filtración tangencial de membranas

Donde:

Pa: Presión de alimento (bar)

Pr: Presión de rechazo (bar)

Patm: Presión atmosférica (bar)

Las unidades en que comúnmente se expresan los valores de PTM en (bar).

- Permeabilidad: Establecido un valor de PTM, la permeabilidad (K), es la cantidad de caudal que puede filtrar la membrana por unidad de superficie, este parámetro se utiliza para evaluar el rendimiento de la operación de las membranas (Del Hombre Bueno, 2012). Esta se calcula según la ecuación 7.

$$K = \frac{Qp}{Sm * PTM}$$

Ecuación 7. Cálculo de permeabilidad (K)

Donde:

Qp: Caudal de permeado

Sm: Superficie membrana

Las unidades que suelen utilizarse en el cálculo de la permeabilidad son LMH bar-1 (l·m²·h⁻¹·bar⁻¹).

- Resistencia a la filtración: Se define como el inverso de la permeabilidad, la resistencia a la filtración (RF), se expresa en función de la viscosidad del fluido, del flujo y de la PTM:

$$RF = \frac{PTM}{\mu * J}$$

Ecuación 8. Calculo de la Resistencia a la Filtración de membranas

Donde:

RF: Resistencia a la filtración (m-1)

μ : Viscosidad del fluido (Pa)

La resistencia a la filtración en un sistema de membrana es la suma de la resistencia de la membrana, la resistencia de la capa de ensuciamiento y la resistencia ofrecida por la interfase membrana-líquido.

- **Aireación:** Las condiciones de aireación son esenciales para los procesos de estos biorreactores, ya que con este se genera la atmosfera adecuada para que los microorganismos logren sintetizar la materia orgánica. El tamaño de la burbuja, la configuración de los módulos, concentración de MLSS y viscosidad del lodo, determinan en gran parte, el grado de ensuciamiento al que se ve sometida la membrana (Meng, Chae, Drews, Kraume, & Shin, 2009). La aireación en los reactores aerobios por lo general se realiza con aireadores sumergidos de burbuja fina, los cuales proporcionan una homogenización del licor mezcla y así mantener la biomasa en suspensión.
- **Concentración de SSLM:** El rango normal de operación en sistemas MBR suele variar entre 6 y 8 g/l de SSLM, aunque algunas plantas en determinadas ocasiones pueden operar con valores de hasta 15-20 g/l, lo que no es recomendable por el incremento de viscosidad del licor mezcla, con el consecuente rápido aumento del fouling. Si la viscosidad es muy elevada, la difusión de las burbujas de aire es deficiente y hay problemas de ensuciamiento en la membrana (Vásquez, 2015). Es de resaltar que para sistemas MBR es muy importante, al igual que la concentración de SS, el tamaño de los flóculos ya que es un factor muy importante en la efectiva separación de la biomasa suspendida del permeado.
- **Edad del fango:** La edad de fango (E) o tiempo de retención celular (SRT), es un parámetro clave en la determinación de la tendencia al ensuciamiento debido a su repercusión sobre la concentración de solidos suspendidos en el licor mezcla (MLSS) y de las EPS. La expresión que permite el calculo de la edad del fango es:

$$E = \frac{\text{Masa de fangos en el reactor}}{\text{Masa de fangos en exceso}} = \frac{V * X}{Q_w * X_w + Q_e * X_e}$$

Ecuación 9. Calculo de Edad del Fango

Donde:

E: Edad del fango (días)

V: Volumen del reactor (m³)

X: Concentración de SS en el reactor (g/m³)

Q_w: Caudal de purga (m³/d)

Xw: Concentración de los SS en la purga (g/m³)
Qe: Caudal del efluente (g/m³)
Xe: Concentración de los SS en el efluente (g/m³)

En consecuencia, si aumenta el tiempo de retención de sólidos disminuye la producción de fangos. Ajustando correctamente la edad del fango en sistemas biológicos se controla la velocidad de degradación del sustrato, la concentración de SSLM y la producción de fango. Para lograr el control de la edad del fango, se lleva a cabo la purga de los fangos en exceso producidos en el reactor. En los MBR se obtiene un efluente libre de SS, por lo que la edad de fango para un determinado volumen de reactor queda definida sólo por la cantidad de sólidos extraídos por la purga. Para un reactor de mezcla completa, la concentración de sólidos en el tanque es igual a la de la purga, por lo que el caudal de purgado requerido para mantener una determinada edad del fango se define como:

$$Q_w = \frac{V}{E}$$

Ecuación 10. Cálculo del caudal de purga

Los MBR deben operar a edades del fango > 15 días. Lo más recomendable es trabajar con la mínima concentración de SSLM que admitiera el sistema en función de la carga contaminante y la E adoptada para los rendimientos previstos (Vásquez, 2015).

2.2.3 Ventajas e Inconvenientes

A continuación, se enumeran las principales ventajas e inconvenientes de la tecnología MBR:

Biorreactores de Membrana (MBR)	
<u>Ventajas</u>	<u>Inconvenientes</u>
Aprovechamiento del espacio y tamaño compacto de la instalación: <ul style="list-style-type: none"> • 2 a 5 veces menor que los tratamientos convencionales • Incremento con respecto a concentraciones típicas en sistemas convencionales de 5 kg/m³ a 12 kg/m³. 	Ensuciamiento de la membrana: <ul style="list-style-type: none"> • Es uno de los mayores problemas de esta tecnología ya que conlleva a la reducción del permeado y aumento de la PTM, además de utilización de productos químicos para las limpiezas.
Menor producción de lodos: <ul style="list-style-type: none"> • Altas edades de fango permiten trabajar a altas concentraciones de sólidos suspendidos (SS) y 	Coste de instalación y cambio de membranas: <ul style="list-style-type: none"> • De la correcta operación de las membranas y el control de los

<p>reducir el tiempo de retención hidráulico (THR).</p> <ul style="list-style-type: none"> Reducción de aproximadamente 30 a 50% en lodos en exceso 	<p>aspectos físicos depende su vida útil, generalmente es de 5 a 8 años, pero en tal caso de cambiar, esto supone un gasto adicional a la tecnología.</p>
<p>Mejor calidad del efluente y altas tasas de desinfección:</p> <ul style="list-style-type: none"> La membrana funciona como barrera contra virus y bacterias, no existe dependencia del proceso de decantación para clarificar el permeado 	<p>Acumulación de sustancias tóxicas en el biorreactor:</p> <ul style="list-style-type: none"> La acumulación de compuestos inorgánicos no filtrables como metales pesados en el licor mezcla, puede llegar a afectar a los microorganismos y la integridad de la membrana.
<p>Elevadas tasas de degradación de contaminantes:</p> <ul style="list-style-type: none"> Debido a las altas edad del fango, favorece el desarrollo de bacterias que pueden degradar compuestos complejos 	<p>Consumo energético:</p> <ul style="list-style-type: none"> El consumo energético de la tecnología convencional es de 0,38 a 0,48 kWh/m³, frente a los consumos del MBR que oscila entre 0,6 a 1,5 kWh/m³, supone un incremento considerable de eficiencia energética que limita la implementación de la tecnología en zonas con deficiencia energética.
<p>Nota: Información tomada y adaptada de tesis realizadas en el Instituto del Agua y Ciencias Ambientales (Del Hombre Bueno, 2012; Domínguez Chabalina, 2010; Martos Parra, 2016; Vásquez, 2015)</p>	

Tabla 4. Ventajas e Inconvenientes de tecnología MBR.

Los desarrollos I+D+i de los últimos años han posibilitado que su implementación tenga un mayor impacto en el mundo, como se puede ver en la figura 6, es creciente el número de plantas instaladas, siendo China el país con mayor capacidad de depuración con MBR. Su versatilidad hace que sea una instalación apropiada para efluentes industriales y con altas cargas orgánicas.

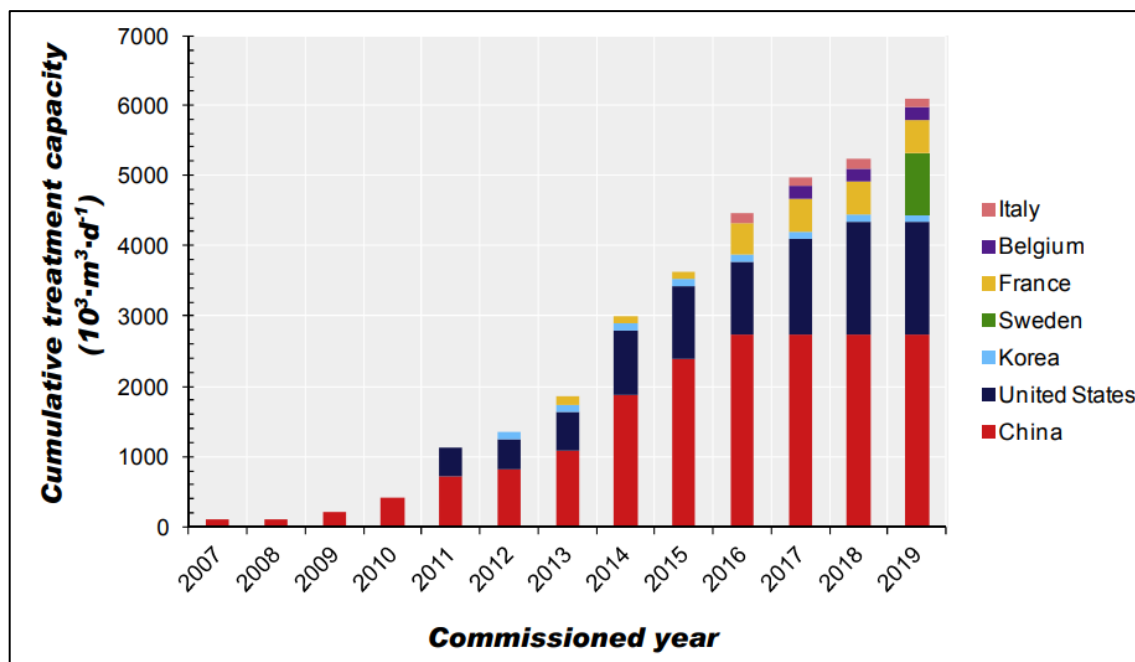


Figura 6. Desarrollo de plantas MBR de larga escala en el mundo (capacidad de más de 100,000 m³/d) (Meng et al., 2017)

2.2.4 Ensuciamiento de Membranas

El ensuciamiento de las membranas se define como la deposición indeseable y la acumulación de microorganismos, coloides, restos de células (“fouling” orgánico) y solutos o precipitados inorgánicos (“scaling”), fundamentalmente carbonato de calcio (CaCO_3) y sulfato de magnesio (MgSO_4), sobre la superficie de la membrana o en el interior de esta (Vásquez, 2015). Como medida operativa, las membranas tienen mecanismos que permiten la mitigación del ensuciamiento, en el caso de las membranas de fibra hueca se cuenta con un retrolavado que permite el desprendimiento de las partículas adheridas a la superficie de la membrana, a diferencia de las membranas planas donde se realizan ciclos de relajación en donde se para la filtración, pero se mantienen la aireación.

Dentro del reactor existen interacciones entre la membrana y el licor mezcla, como se ve en la figura 7, las cuales también condicionan el ensuciamiento de la membrana. Las características del medio como la viscosidad aumentan la resistencia de la membrana y disminuyen la permeabilidad, a su vez incrementan la PTM (Trussel, Merlo, Hermanowicz, & Jenkins, 2007); otro factor que es relevante en el ensuciamiento es el carácter hidrofóbico de las membranas, hace que el ensuciamiento sea más rápido, al contrario de la hidrofílicas, en las cuales según experimentaciones realizadas se reducen los índices de ensuciamiento (Dominguez Chabalina, 2010), dentro de estas características de la membrana también están la porosidad la rugosidad, la composición entre otros. Por último, están los factores biológicos, a los que se le atribuye en gran proporción el rápido ensuciamiento de las membranas, en este se destacan la producción de EPS por parte de los microorganismos, estos serán explicados en detalle en el numeral 2.2.5.

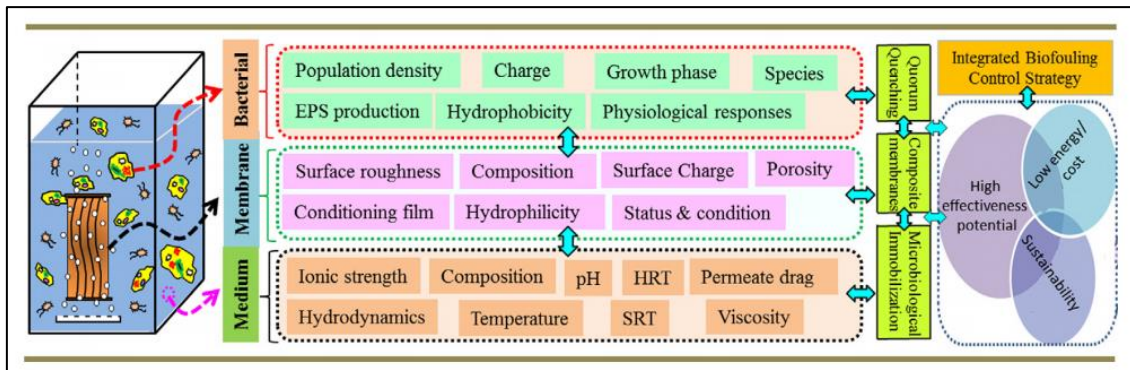


Figura 7. Representación esquemática de los factores que inciden en el ensuciamiento de la membrana (Aslam, Ahmad, & Kim, 2018)

En este tipo de sistemas donde la membrana se encuentra sumergida en el licor mezcla, como ya se expresó anteriormente el factor biológico es el gran responsable del ensuciamiento de las membranas. Como se ve en la figura 8, las deposiciones en la superficie de la membrana de sustancias celulares generan capas que no permiten la filtración, a su vez, también se considera el ensuciamiento dentro del poro de la membrana el cual se puede dar por partículas del lodo, coloides y solutos presentes en el reactor.

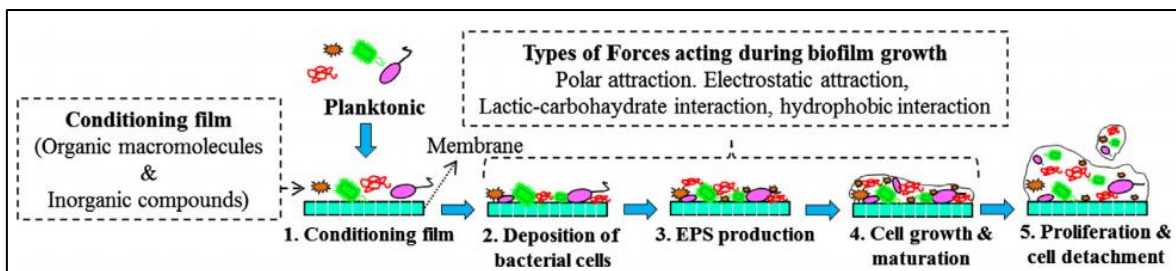


Figura 8. Mecanismos de bio-ensuciamiento en la superficie de las membranas (Aslam et al., 2018)

El ensuciamiento de las membranas en sistemas MBR tiene gran variedad de causas y se considera que es el resultado de distintas interacciones entre fenómenos que ocurren en el reactor; existen dos tipos de ensuciamiento reportados por (Meng et al., 2009), el reversible e irreversible, haciendo referencia al tipo de tratamiento que se utiliza para poder remover las sustancias no deseadas de la membrana, el reversible se denomina como el que tipo de ensuciamiento puede ser fácilmente eliminado ya que son deposiciones en forma de torta en la superficie, mientras que el irreversible es clasificado como aquel ensuciamiento atribuido al bloqueo de poros. También existen diferentes significados para estos tipos de ensuciamiento, (Dominguez Chabalina, 2010) hace referencia al significado los tipos de ensuciamiento, en donde resalta que este puede ser determinado por el tipo de limpieza, clasificando el irreversible en ensuciamiento eliminable, el no eliminable e irreversible; la diferencia de esta clasificación es que el ensuciamiento eliminable es el que puede ser removido por medio físicos, el no eliminable que no puede ser removido por medios físicos y el irreversible es el que no puede ser removido por medios químicos.

2.2.5 Sustancias Poliméricas Extracelulares

Las Sustancias Poliméricas Extracelulares o Extracelular Polymeric Substances (EPS's), son una mezcla compleja de polímeros de alto peso molecular, consisten en proteínas, ácidos húmicos, carbohidratos, polisacáridos, ácidos urónicos, ácidos nucleicos lípidos etc, la producción de estas sustancias es un atributo general de los microorganismos en ambientes naturales y ocurre en organismos procariotas y eucariotas; en el tratamiento biológico de aguas residuales, los microorganismos se encuentran en forma de agregados microbianos, como biopelículas, flóculos de lodo y gránulos; las EPS se forman como una capa alrededor de agregados microbianos para proporcionar una matriz protectora tridimensional contra el estrés externo, que se describe como "casa de células" o "matriz de células" (Shi et al., 2017). La función de esta matriz es agrupar las bacterias en películas biológicas, las cuales permiten la generación de una barrera de protección en la cual los microorganismos pueden vivir prolongadamente a determinadas condiciones, pero las EPS pueden formar matrices de gel excesivamente hidratadas de las cuales se encuentran las bacterias y por lo tanto crear una barrera al flujo del permeado en los procesos de membrana (Dominguez Chabalina, 2010).

Las EPS pueden proceder de la lisis de las células, del desprendimiento de material de la superficie de la superficie de las células, y de la materia orgánica presente en el agua residual (Dominguez Chabalina, 2010). Estas sustancias pueden dividirse en dos grupos, EPS solubles y EPS enlazada; el primer tipo tras varias investigaciones, varios autores coinciden en que estas sustancias son las mismas que los Productos Solubles Microbianos (Le-Clech, Chen, & Fane, 2006; Rosenberger, Evenblij, Te Poele, Wintgens, & Laabs, 2005) y son sustancias que incluyen polímeros solubles producidos microbiológicamente, productos de la hidrólisis de la materia orgánica adherida y moléculas orgánicas liberadas en la lisis celular; las EPS enlazadas incluyen polímeros enlazadas producidos microbiológicamente, productos de la lisis celular y la hidrólisis, así como la materia adsorbida o adherida (Domínguez, Rodríguez, & Prats, 2010).

Las EPS solubles son las que intervienen mayoritariamente en el ensuciamiento de la membrana, (Del Hombre Bueno, 2012) enumera las principales situaciones en las que estas sustancias son excretadas::

- ✓ Mantenimiento del equilibrio de concentración
- ✓ Situación de carencia de alimento
- ✓ Muerte acelerada por el sustrato
- ✓ Disponibilidad de nutrientes
- ✓ Estrés medio ambiental
- ✓ Crecimiento bacteriano y metabolismo

La determinación de estas sustancias es altamente variable dependiendo de su método de extracción, tipo de flujo, tipo de reactor y proceso; existen diferentes tipos de extracción que incluyen resinas de intercambio catiónica, métodos de calentamiento, centrifugación por formaldehído (Le-Clech et al., 2006), gracias a la investigación realizada por (Dominguez Chabalina, 2010), se establece que las sustancias mayoritarias EPS que ensucian la membrana son **Proteínas, Ácidos Húmicos y Carbohidratos**.

2.3 Electrocoagulación

Uno de los procesos más utilizados en el tratamiento de aguas es la coagulación química, que consiste en la dosificación de una sustancias químicas que desestabilizan la materia coloidal y las aglomera en flóculos (Keeley, Jarvis, Smith, & Judd, 2016). La electrocoagulación ha sido una tecnología emergente desde 1906, con la primera patente concedida en Estados Unidos. Desde el siglo XIX, exactamente en 1888, se efectuó el primer ensayo reportado en Londres por Webster. Su proceso utilizaba ánodos de hierro soluble, con una caída de potencial de 1.8 vatios entre los electrodos, distantes una pulgada, y una corriente anódica de 0.6 Amp/pie² (Restrepo, Arango, & Gardes, 2006).

Para la coagulación química se utilizan sustancias como el sulfato de aluminio, cloruro férrico, policloruro de aluminio y otros polielectrolitos; en el caso de la electrocoagulación se utilizan aluminio y hierro como material anódico, los cuales al aplicarles una intensidad de corriente eléctrica se provoca la oxidación electrolítica del material liberando in-situ el coagulante

En el área del tratamiento de las aguas residuales, la electrocoagulación ha demostrado ser altamente efectiva en la eliminación de coloides (1-1000 nm), en la reducción de la DQO, eliminación de sales (amonio, sulfatos, fosfatos), eliminación de policlorobifenilos, cianuros, nitritos, fenoles, tensioactivos, tintes y colorantes, eliminación de grasas, aceites y emulsiones, electro-deposición de metales pesados (Zn, Pb, Ni, Cr) y, más recientemente, eliminación de contaminantes emergentes (Predolin, 2019).

Los factores que tienen directa relación con la electrocoagulación se enumeran a continuación ² :

- ✓ pH: Tiene influencia directa en la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido.
- ✓ Conductividad: Un aumento en este parámetro significa un incremento en la densidad de corriente, es decir, que si en el reactor hay mas iones se facilita el transporte de la corriente a través de este, pero también a conductividades muy altas que son producto de iones carbonato y sulfatos puede conducir a la precipitación de Ca⁺² y Mg⁺² produciendo una capa insoluble depositada sobre los electrodos que aumentaría el potencial entre éstos, decreciendo así la eficiencia de la corriente
- ✓ Densidad de corriente: Este parámetro determina en primer lugar la liberación de iones del coagulante (Al⁺³ y Fe⁺²) liberados por los respectivos electrodos. En según lugar la eficiencia de remoción, que aumenta al ser aumentada la densidad, pero también aumenta su consumo energético.
- ✓ Temperatura: Este parámetro influye la destrucción de la película de oxido de la superficie del electrodo.
- ✓ Configuración del campo eléctrico: Hace referencia a la separación entre los electrodos e influye directamente en la eficiencia del proceso debido al gradiente entre ellos.

² Información tomada de (Predolin, 2019) y (Restrepo et al., 2006)

- ✓ Material electrodoico: En los procesos de electrocoagulación, el cátodo puede ser de metal, grafito, fibras de carbón, acero o titanio y el material anódico más empleado suelen ser láminas de aluminio o hierro. De su correcta elección depende la viabilidad del proceso y consumos energéticos.
- ✓ Tiempo de exposición a la corriente.

Algunos tienen mayor influencia que otros y puede variar su eficiencia también considerando tamaño del reactor, viscosidad del fluido entre otros (Restrepo et al., 2006)

Los mecanismos por los que la electrocoagulación desestabiliza las partículas son los siguientes ³:

- ✓ Comprensión de doble capa.
- ✓ La neutralización de carga superficial.
- ✓ Adsorción y punteo interparticular

Recientemente para contrarrestar el ensuciamiento de las membranas en sistemas MBR, se han probado diferentes tipos de procedimientos y sistemas complementarios a la tecnología; como podemos ver en la figura 9, (Bagheri & Mirbagheri, 2018) enumeran una serie de posibles soluciones al ensuciamiento de las membranas, entre ellas la electrocoagulación, la cual reduce costos en materias químicas, reduce espacio en las instalaciones y es altamente eficiente; esto es beneficioso a la implementación de los MBR ya que baja sobrecostos en mantenimiento y cambio de membranas, utilización de sustancias químicas y en ocasiones bajas de eficiencia de tratamiento.

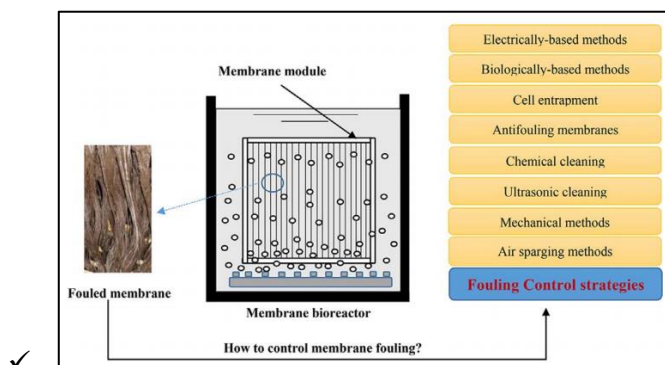


Figura 9. Esquema de posibles soluciones al ensuciamiento de las membranas (Bagheri & Mirbagheri, 2018)

³ Información tomada de (Predolin, 2019)

2.3.1 Reacciones químicas del proceso

Para realizar este proceso, los electrodos son sumergidos en un reactor y estos son conectados a la fuente de poder, tal y como se en la figura 10.

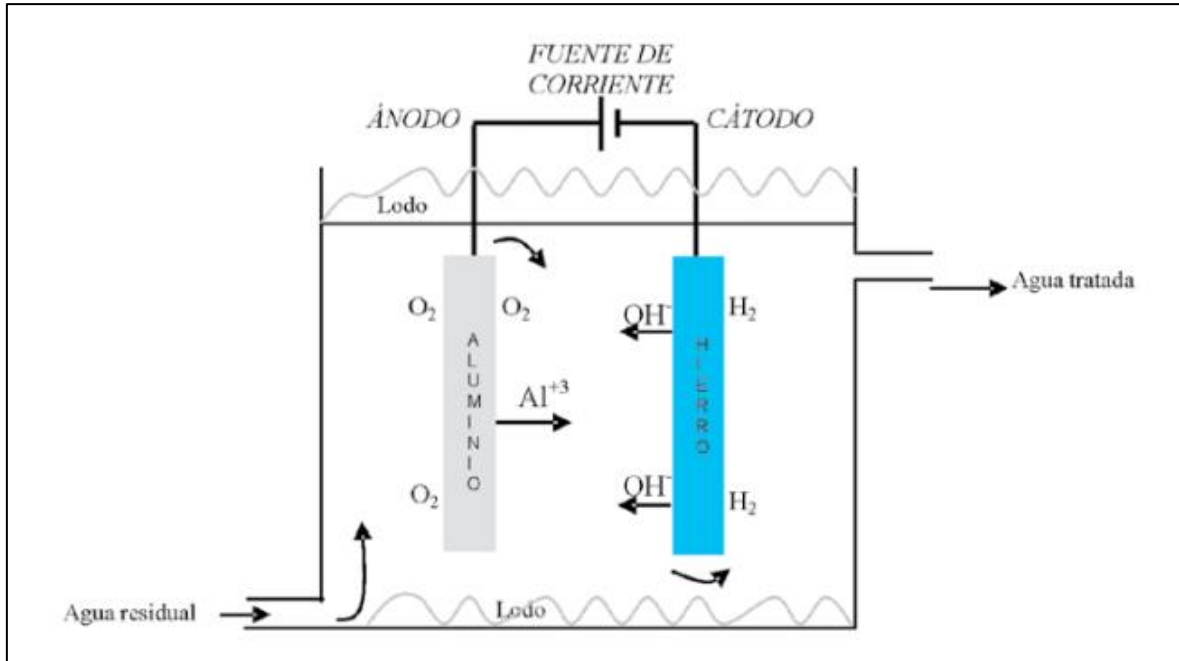
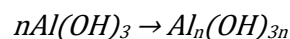
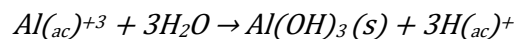
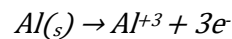


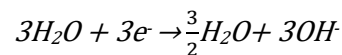
Figura 10. Esquema del funcionamiento de la electrocoagulación (Restrepo et al., 2006)

Dentro del reactor ocurren los fenómenos previamente descritos, además tiene lugar una serie de siguientes reacciones químicas en los distintos electrodos⁴:

Ánodo:



Cátodo:



Los iones Al^{+3} en combinación con los OH^{-} reaccionan para formar algunas especies monoméricas como $Al(OH)^{2+}$, $Al_2(OH)^{2+}$, $Al(OH)^{2+}$, y otras poliméricas, tales como $Al_6(OH)_{15}^{3+}$, $Al_7(OH)_{17}^{4+}$, $Al_8(OH)_{20}^{4+}$, $Al_{13}O_4(OH)_{24}^{7+}$ y $Al_{13}(OH)_{34}^{5+}$ que por procesos de precipitación forman el $Al(OH)_3(s)$, como se muestra en la reacción de ánodo. El $Al(OH)_3(s)$ es una sustancia amorfa de carácter gelatinoso, que expone una gran área superficial con

⁴ Información tomada de (Predolin, 2019)

propiedades absorbentes y que es propicia para los procesos de adsorción y atracción de las partículas contaminantes (Navarro, 2008).

3. Objeto y Justificación de la Investigación

3.1 Planteamiento del Problema

El tratamiento de las aguas residuales urbanas convencional, comprende variedad de sistemas conectados que permiten la eliminación de materia orgánica, nutrientes, contaminantes y compuestos producto de la propia actividad antropogénica, estos dependiendo del grado de efectividad en su operación y diseño garantizan niveles de depuración normales, pero debido al crecimiento poblacional, las altas cargas orgánicas además de los altos niveles de contaminación de los vertidos y la necesidad de mejoramiento tecnológico en la depuración, surge una posible solución que se desarrolla a escala piloto en el laboratorio del Instituto del Agua y las Ciencias Ambientales de la Universidad de Alicante.

Se trata de un sistema híbrido que une un reactor Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) y un reactor Submerged Membrane Bioreactor (SMBR), el cual es alimentado por una mezcla que simula las condiciones de agua residual urbana. Los experimentos realizados con el piloto, además de la correcta eliminación de materia orgánica y nutrientes, tienen como objetivo la eliminación de sustancias de preocupación emergente integrando un elemento al reactor biológico, la electrocoagulación, lo cual transforma el reactor biológico en un Submerged Membrane Electro-Bioreactor (SMEBR). Con el fin de continuar con la investigación de las distintas interacciones y soluciones de los problemas de depuración del piloto, se propone el estudio de las Extracelular Polymeric Substances (EPS) en el reactor aerobio a distintas densidades de corriente de la electrocoagulación.

3.2 Objetivo General

Utilizar la planta híbrida piloto ubicada en el laboratorio del IUACA, con el fin de evaluar el comportamiento de las EPS en el reactor aerobio con la implementación de la electrocoagulación a diferentes densidades de corriente.

3.3 Objetivos Específicos

1. Extraer y caracterizar las EPS en el reactor aerobio.
2. Evaluar la influencia de las EPS en la evolución de la presión transmembrana a densidades de corriente de 5 A/m² y 10 A/m²
3. Medir el aluminio residual en el fango del reactor.
4. Evaluar la aplicabilidad de la tecnología en Colombia.

4. Materiales y Métodos

Esta investigación se realizó en las instalaciones del laboratorio del Instituto del Agua y las Ciencias Ambientales, las analíticas rutinarias se hacen con kits de la marca Merck y analitos de marcas homologadas junto con procesos analíticos adecuados que garantizan la calidad del resultado. La prueba de metales en el lodo del SMEBR se envía a servicios técnicos de la Universidad de Alicante.

4.1 Descripción de la Planta

Dentro de las múltiples opciones que en la actualidad están surgiendo para el tratamiento de efluentes domésticos e industriales, el IUACA propone la combinación de sistemas de tratamiento biológico anaerobio primario mediante un reactor UASB y secundario/terciario aerobio que junto con una filtración por medio de una membrana sumergida en el reactor tiene muy buenos resultados en la depuración de aguas residuales. En la figura 11 se puede ver la planta, los reactores principales están hechos de PVC, las conexiones en distintos diámetros y materiales de plástico, bombas peristálticas y una controladora que lleva los ciclos programados y a su vez realiza un registro en un programa desarrollado en Visual Basic por personal del IUACA.

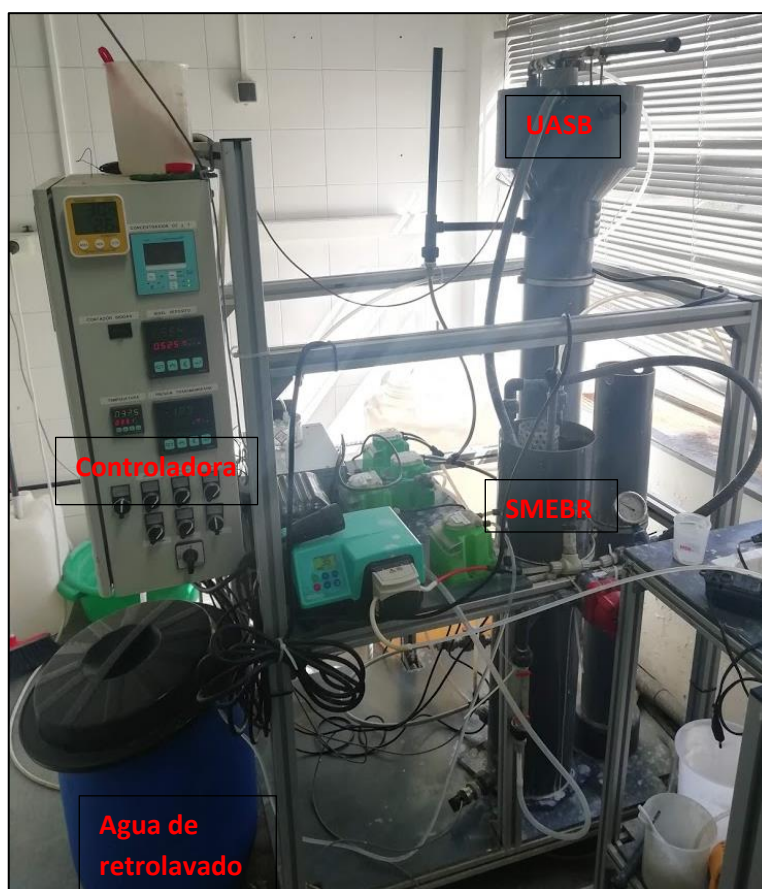


Figura 11. Fotografía de la planta híbrida
Fuente: Elaboración Propia

4.1.1 Funcionamiento y operación

La planta piloto consta de un tanque de alimentación, el cual es preparado según los parámetros de la tabla 5, este es conectado a una bomba peristáltica Dosiper que realiza ciclos de alimentación de 1 minuto alimentando cada 10 minutos a una conexión que recircula desde la parte superior del reactor UASB a la parte inferior del mismo. A partir de esta primera alimentación, la materia orgánica simulada es digerida por organismos anaerobios en el reactor de flujo ascendente; el sobrenadante de este reactor es llevado por medio una conexión al reactor SMBR, en donde se realizan procesos de digestión aerobia y la filtración de la membrana sumergida en ciclos de 1 minuto permeando cada 7 minutos por medio de una Bomba Peristáltica Watson.

Preparación de alimento sintético	
<i>Compuesto (g)</i>	<i>DQO de referencia 800 mg/L para 200 L</i>
Peptona Case	84,27
Extracto de carne	57,93
MgSO-4H ₂ O	1,05
KH ₂ PO ₄	2,11
CaCl ₂ 2 H ₂ O	3,69
NaCl	15,80
NaHCO ₃	14,75

Tabla 5. Compuestos en la preparación del Agua Residual Urbana sintética (ARUs)

Por el tipo de membrana utilizada, se realizan retrolavados 1 minuto cada 10 minutos, como el fin de esta investigación incluye la eliminación de contaminantes emergente dopados al sistema, el retrolavado se realiza con agua potable con el fin de no volver a introducir dichos contaminantes al sistema. En la figura 12, se puede ver un esquema del funcionamiento de la planta.

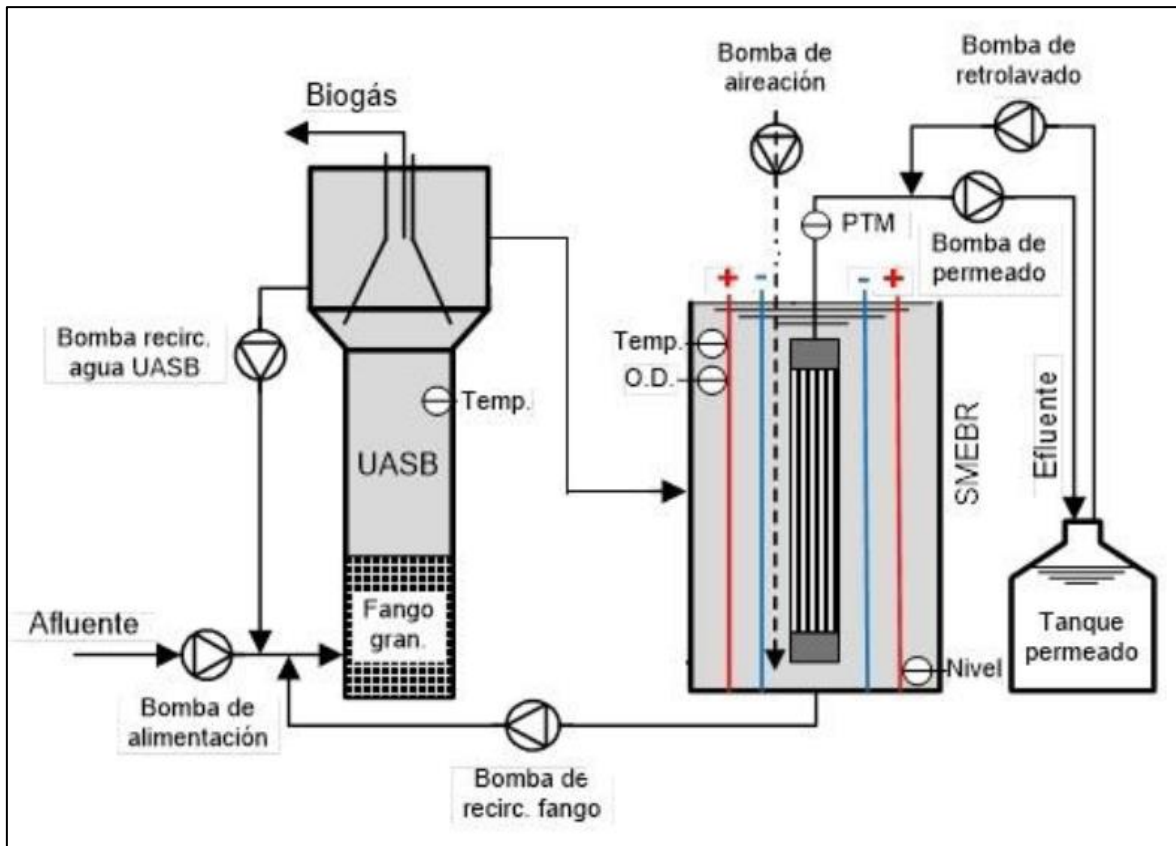


Figura 12. Esquema de planta híbrida

Fuente: (Mora Cabrera, 2019)

El sistema de por sí es eficiente en la remoción de materia orgánica, pero con bajas eficiencias en cuanto a nutrientes (Moya Llamas, 2018), gracias a previas investigaciones desarrolladas por (Bani-Melhem & Elektorowicz, 2011; Giwa, Dindi, & Kujawa, 2019; Hasan, Elektorowicz, & Oleszkiewicz, 2012; Hua, Huang, Su, Nguyen, & Chen, 2015; Ibeid, Elektorowicz, & Oleszkiewicz, 2015) se establece que el acoplamiento de un sistema electrocoagulador al tanque MBR en primer lugar, mejora la eficiencia de remoción de nutrientes y segundo reduce el ensuciamiento de la membrana; esta última razón es donde se enfoca el presente trabajo para poder evaluar el ensuciamiento en este tipo de sistema y membrana.

En la figura 13, se puede ver el esquema general de montaje de la electrocoagulación al tanque MBR, utilizando como ánodo aluminio y como cátodo acero inoxidable. La fuente de poder proporciona ciclos de trabajo de 5 minutos encendida y 10 minutos apagada.

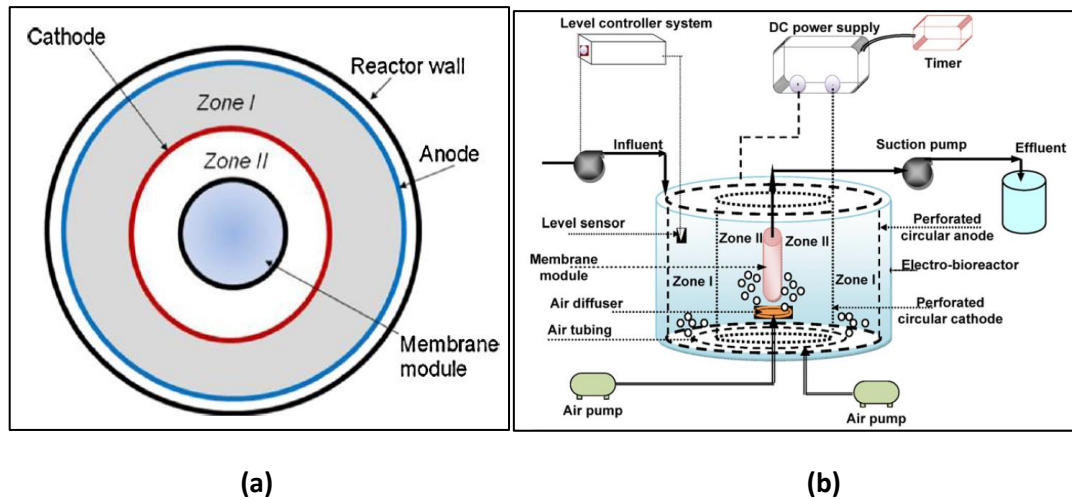


Figura 13. (a) vista superior del sistema SMEBR (b) sistema experimental de SMEBR (Bani-Melhem & Elektorowicz, 2011)

El montaje de las chapas para la electrocoagulación, ver figura 14, se realizo teniendo en cuenta las siguientes características de la chapa de aluminio (ánodo de sacrificio):

- ✓ Área Total: 0,42 m²
- ✓ Área abierta (perforaciones): 48% de área total
- ✓ Diámetro y separación de cada perforación: 8mm y 11 mm
- ✓ Área sumergida en el reactor: 0,3 m²
- ✓ Área útil para electrocoagulación: 0,16 m²



Figura 14. Montaje de chapas de electrocoagulación a membrana Fuente: Elaboración Propia

Con estas características, se procede a calcular las densidades de corriente aplicables para cada secuencia de electrocoagulación:

Programación de electrocoagulación	
Densidad de electrocoagulación	Intensidad Corriente (A)
5 A/m ²	0,82
10 A/m ²	1,65

Tabla 6. Corriente en amperios aplicada a cada ciclo de electrocoagulación


El equipo utilizado para generar la corriente que permite el proceso es un equipo regulador de voltaje marca Blausonic 5A FA-350, ver figura 15, programado con la controladora de la planta.




Figura 15. Regulador de voltaje empleado para la electrocoagulación.
Fuente: Elaboración Propia

4.1.2 Membrana Utilizada

Como ya se explico en el anterior apartado, el presente trabajo se enfoca en evaluar la electrocoagulación en la reducción del ensuciamiento de la membrana, que para efectos de este estudio es una membrana capitar con las siguientes características:





TM

PURON[®] HOLLOW FIBER DEMO ROWS

Hollow Fiber Submerged Membrane Demo Row for MBR and Tertiary Applications

PRODUCT DESCRIPTION

Membrane Chemistry:	Proprietary PVDF
Membrane Type:	Braided hollow fiber for outside-in operation
Fiber Support Chemistry:	Polyester
Nominal Pore Size:	0.03 µm
Outside Fiber Diameter:	0.1 inch (2.6 mm)
Regulatory Information:	Accepted by California Department of Public Health (CDPH) for compliance with California Water Recycling Criteria (Title 22)
Potting Material:	Proprietary epoxy compound
Storage Solution:	Glycerin

PRODUCT SPECIFICATIONS

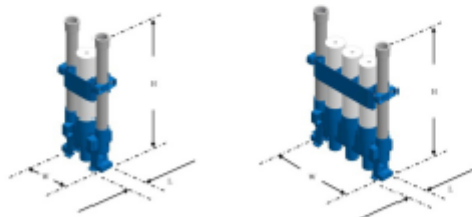
Model	Membrane Area ft ² (m ²)
Single bundle Demo Module	5 (0.5)
Triple bundle Demo Module	15 (1.4)

OPERATING & DESIGN INFORMATION*

Temperature Range:	41 - 104°F (5 - 40°C)
Maximum Filtration Transmembrane Pressure:	9 psi (0.6 bar)
Maximum Backflush Transmembrane Pressure:	9 psi (0.6 bar)
Allowable pH Range for Cleaning:	2.0 - 10.5
Maximum Allowed Total Chlorine @ 95°F (35°C) or Lower:	1,000 ppm @ pH 8 or higher during maintenance clean
Maximum Allowed Total Chlorine @ 95°F (35°C) or Lower:	2,000 ppm @ pH 8 or higher during recovery clean
Maximum Allowed Total Chlorine Contact:	500,000 ppm-hrs cumulative
Typical Air Flow Rate Per Bundle:	1-2 Nm ³ /hr (0.6-1.3 scfm)
Typical Permeate Flow Rate Per Bundle:	5-15 L/hr (1.3-4.0 Gal/hr)

* Consult Process Technology Group for specific applications.

NOMINAL DIMENSIONS & WEIGHT



Model	L Inches (mm)	W Inches (mm)	H Inches (mm)	Dry Weight Pounds (kg)
Single bundle	3.62 (92)	7.36 (187)	20.87 (530)	3.0 (1.4)
Triple bundle	3.62 (92)	13.70 (348)	20.87 (530)	5.5 (2.5)

All connections: d40 threaded union

Fuente: Tomado de

<https://www.kochmembrane.com/KochMembraneSolutions/media/Product-Datasheets/Test%20Products/puron-hf-demo-rows-datasheet.pdf>

Como datos importantes de la membrana se resaltan:

- ✓ Membrana de fibra hueca trenzada con aplicaciones MBR o terciarios
- ✓ Materia (Poliéster)
- ✓ Ultrafiltración (0,03 µm)
- ✓ Área de la membrana (0,5 m²)
- ✓ Presión transmembrana de filtración y retrolavado (0,6 bar)

4.1.3 Limpiezas

Las limpiezas a la membrana son procesos necesarios para eliminar los tipos de ensuciamiento descritos en el numeral 2.2.4, existen limpiezas físicas realizadas aplicando abundante agua a la membrana eliminando suciedad superficial y existe otra que es la química, en donde la membrana después de aplicar el tratamiento físico es sumergida en una solución de Ácido Oxálico, Ácido Cítrico o Hipoclorito por un determinado tiempo. Para la realización de la presente investigación, se realizaba una siembra nueva de lodo antes de cada serie de electrocoagulación y se realizaba una limpieza física con el fin de que la membrana volviera a una condición estable. En la figura 14, se puede ver el estado visual en que salía la membrana después de la serie de 5 A/m².



Figura 16. Estado de membrana después de una serie de electrocoagulación
Fuente: Elaboración Propia

4.2 Analíticas realizadas

Las analíticas se realizan en el laboratorio del instituto siguiendo los procedimientos establecidos por el mismo para garantizar la fiabilidad de los análisis. La frecuencia en los análisis se realiza según la siguiente tabla:

Parámetros	Frecuencia de muestro	Puntos			
		Aliment o	Sobrenadant e UASB	Licor mezcla reactor MBR	Permead o
pH	3/semana	X	x	x	x
Conductividad	3/semana	X	x	x	x

Sólidos Suspensión	3/semana			x	
Sólidos Volátiles	3/semana			x	
DQO	3/semana	X	x	x	x
Fosforo Total	3/semana	X			x
Nitrógeno Total	3/semana	X			x
Amonio	3/semana	X	x		x
Nitritos	3/semana	X	x		x
Nitratos	3/semana	X	x		x
Filtrabilidad	3/semana			x	
Viscosidad	3/semana			x	
EPS's	5/semana			x	
Aluminio en fango	1/ciclo de electrocoagulación			x	

Tabla 7. Frecuencia de analíticas

El control de estos parámetros es fundamental para evaluar el funcionamiento de la planta y evaluar los cambios que se presentan en ella; los parámetros relevantes para la evaluación del ensuciamiento y comportamiento del reactor SMEBR son los siguientes:

- **pH, conductividad y potencial**

El pH o potencial de hidrogeniones es una medida de acidez o alcalinidad de una sustancia, esta medición permite cuantificar la actividad de los iones en un rango de 0 a 14, siendo 7 pH neutro, mayor que 7 básico y menor que 7 ácido a 25°C.

La medida de conductividad determina la cantidad de sales solubles en una sustancia.

El potencial redox (ORP) es una forma de medir la energía química de oxidación-reducción mediante un electrodo, convirtiéndola en energía eléctrica, este es positivo cuando se produce oxidación y negativo cuando se produce reducción.

Materiales:

- ✓ pH metro CRISON (Modelo BASIC 20+), con electrodo de compensación de temperatura y Conductímetro CRISON (Modelo CM 35), ver figura
- ✓ Vaso de precipitado 50 mL
- ✓ Mosca de agitación

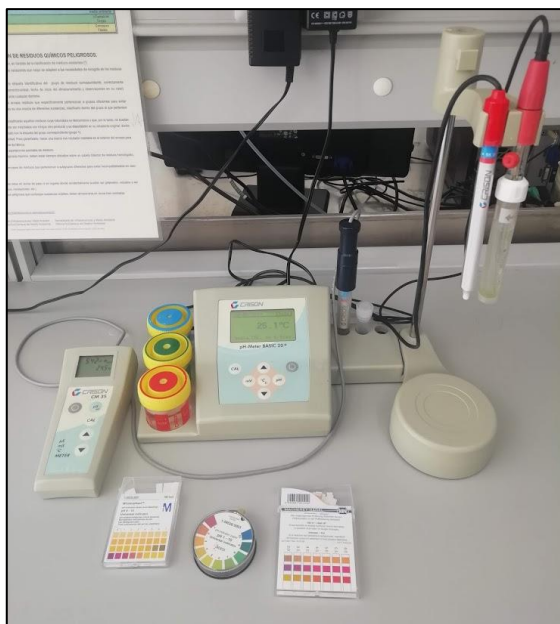


Figura 17. Equipos de medición de pH, Conductividad y potencial redox
Fuente: Elaboración Propia

- **Sólidos en suspensión y sólidos volátiles**

Los sólidos en suspensión (SS) son los obtenidos tras la filtración de un volumen determinado de muestra a través de un filtro de fibra de vidrio (Merck-Milipore) con un tamaño nominal de poro de $0,7 \mu\text{m}$, estos son llevados a la estufa (a) a 105°C por un periodo de una hora y posteriormente son pesados en una balanza.

Los sólidos volátiles (SV) son la fracción de sólidos que posterior a su calentamiento a 105°C , son introducidos en una mufla (b) a 550°C por 4 horas.



(a)



(b)

Figura 18. (a) estufa (b) mufla
Fuente: Elaboración Propia

- **Viscosidad (μ)**

La viscosidad es una propiedad de los fluidos equivalente al concepto de espesor, a la resistencia que tienen ciertas sustancias para fluir, para sufrir deformaciones graduales producto de tensiones cortantes o tensiones de tracción. Para la medida de la viscosidad se utilizó un viscosímetro rotacional SMART SERIES, Modelo L, de Fungilab, ver figura 19, este posee un adaptador de baja viscosidad para trabajar en el rango de bajas viscosidades comprendido entre 1 y 2000 cP (Predolin, 2019).



Figura 19. Viscosímetro
Fuente: Elaboración Propia

- **Filtrabilidad**

La técnica de filtrabilidad del lodo activo se usa para observar el comportamiento del licor mezcla en el proceso de filtración, este proceso se realiza doblando en 16 partes iguales un papel filtro sobre una probeta, en donde se adicionan 50 mL de lodo y se cronometran 5 minutos de filtración. Si el valor es mayor de 10 mL, la filtrabilidad se considera buena; si el valor obtenido es menor de 5 mL, la filtrabilidad se considera mala (Dominguez Chabalina, 2010), ver materiales en la figura 20.

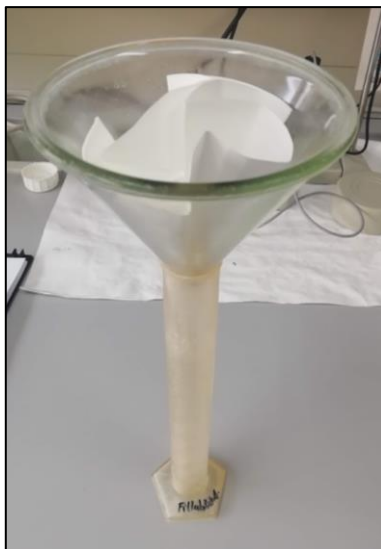


Figura 20. Materiales para prueba de filtrabilidad
Fuente: Elaboración Propia

Los análisis químicos realizados a continuación, son realizados mediante el método fotométrico, utilizando cubetas-test Merck, termoreactores (a) y un espectrofotómetro marca NOVA 60 (b), ver figura 21; el proceso y los rangos son seleccionados dependiendo de la muestra, es de resaltar que se realizan los análisis siguiendo las guías proporcionadas por el fabricante.

(<https://www.merckmillipore.com/ES/es/products/analytcs-sample-prep/test-kits-and-photometric-methods/base-parameters-from-a-z/5Mmb.qB.QBgAAAFDxBB4saSR.nav>).



(a)



(b)

Figura 21. (a) termoreactores, (b) espectrofotómetro
Fuente: Elaboración Propia

- ***Demanda Química de Oxígeno (DQO)***

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) es una medida del oxígeno equivalente al contenido de materia orgánica de una muestra susceptible a la oxidación por un fuerte

oxidante químico, el método mas utilizado es el del dicromato el cual debido a su capacidad de oxidación; La prueba se lleva a cabo calentando a reflujo, abierto o cerrado, un determinado volumen de muestra con dicromato potásico ($K_2Cr_2O_7$) en exceso, en presencia de ácido sulfúrico (H_2SO_4), durante 2 h. La materia orgánica de la muestra se oxida y, como resultado, el dicromato (Cr^{+6} , amarillo) se reduce a Cr^{+3} (verde) (Vásquez, 2015).

- **Fosforo**

El fósforo junto con el nitrógeno, son dos de los nutrientes fundamentales de todos los seres vivos, de forma que contenidos anormalmente altos de estos en las aguas pueden producir un crecimiento incontrolado de la biomasa acuática (eutrofización). Una gran parte del fósforo presente en las aguas se debe al uso de abonos fosfatados y detergentes. La determinación se efectúa por espectrofotometría, siendo necesaria la digestión previa de los polifosfatos en fosfatos, para su análisis posterior (Mendes Predolin, 2015).

4.3 Extracción de EPS's (soluble y enlazada) y Determinación de EPS's mayoritarias (Ácidos Húmicos, Proteínas y Carbohidratos)

Considerando una investigación anterior realizada en el IUACA, se decide que el método más conveniente para la extracción y determinación de las EPS's es el desarrollado por (Dominguez Chabalina, 2010). La metodología se realizó siguiendo el documento "*Determinación de las sustancias poliméricas extracelulares: Método extraído de tesis de (Dominguez Chabalina, 2010); esquematizado por (Del Hombre Bueno, 2012)*", este se puede ver en el anexo 1.

5. Resultados y Discusión

La experimentación se realizó durante 91 días, el fango del reactor MBR provenía de la EDAR Orgegia con una edad de 30 días y el fango del UASB provenía de una industria cervecera, este ya estabilizado en el reactor; los ciclos de electrocoagulación se realizaron de la siguiente manera:

Cronograma de ejecución		
	Tiempo en días de operación	Tiempo en días de adaptación del fango
Sin Electrocoagulación	18	23 ⁵

⁵ Este periodo de tiempo hace referencia desde el comienzo de las practicas, el lodo llevaba en el reactor un aproximado de 43 días.

Con electrocoagulación 5 A/m ²	18	7
Con electrocoagulación 10 A/m ²	17	9

Tabla 8. Ejecución de ciclos de electrocoagulación

5.1 Analíticas de control realizadas

• Resultados pH y Conductividad

Dos parámetros de control básicos para conocer en qué estado se encuentra la planta y si se están realizando los procesos microbiológicos correctamente son el pH y la conductividad, como se puede ver en la figura 22, tanto el alimento, UASB y SMEBR se encuentra en rangos de 6,5 a 8 de pH (en rango de neutralidad) y 1000 a 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de conductividad, considerada como baja.

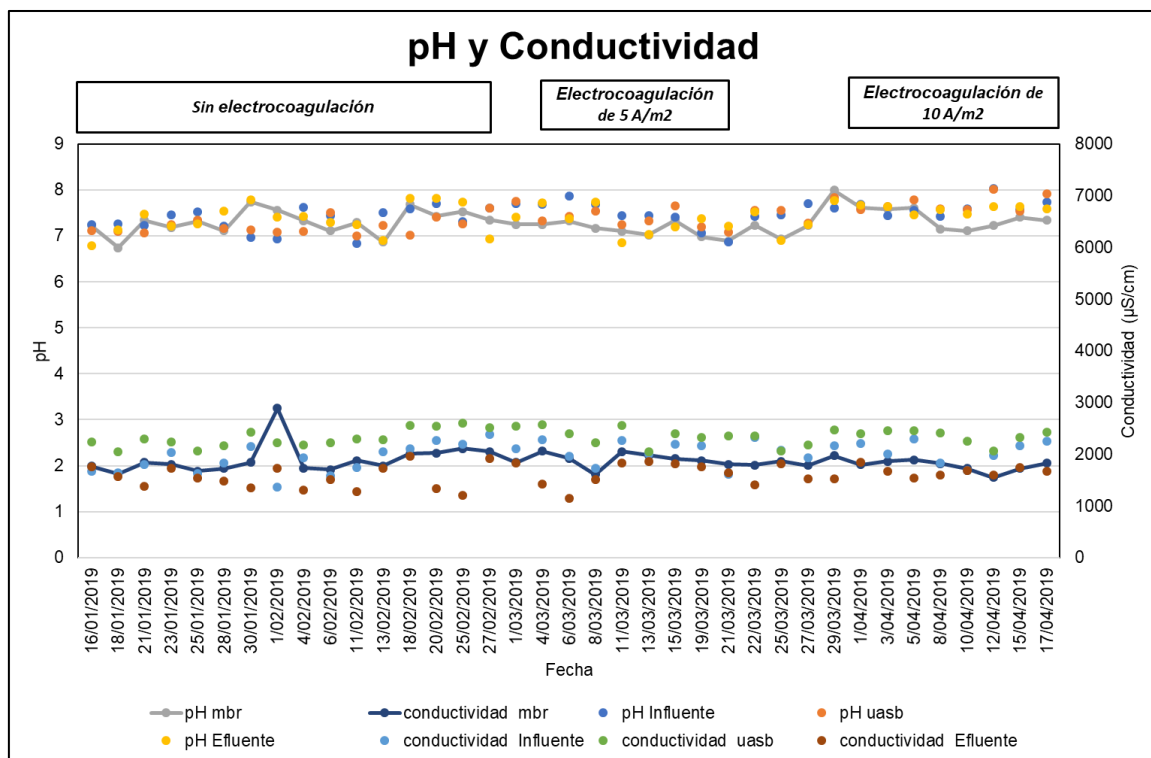


Figura 22. Comportamiento de pH y Conductividad
 Fuente: Elaboración Propia

Además de la medición de estos dos parámetros, se realizó la medición de potencial de oxidación-reducción (ORP). Este se maneja en diferentes rangos; por debajo de -200 mV para condiciones anaeróbicas, de -200 a +200 mV para condiciones anóxicas y superior a +200 mV para condiciones aeróbicas (Predolin, 2019). Todos los resultados registrados

para el reactor aerobio fueron positivos y superiores a 200 mV (242 ± 20), lo que confirma que todas las fases se realizaron en condiciones aeróbicas.

- *Resultados SS, SSV y Viscosidad del licor mezcla*

El fango provenía como ya se dijo anteriormente de la EDAR Orgegía, este tenía un periodo de adaptación a las condiciones de la planta; generalmente el fango provenía con una proporción de 4000 a 6000 mg/L de SS y el 80% de fracción volátil como lo indica la teoría, los cuales descendían ya que el ingreso de materia orgánica el MBR está en el orden de 150 a 200 mg/L de DQO y estos en planta tenían ingreso del primario de concentraciones del orden de 400 mg/L. En condiciones normales de operación la concentración de SS se mantenía de 2000 a 4000 mg/L y era variable dependiendo de las condiciones de operación; con la electrocoagulación de 5 A/m² los SS incrementaron aproximadamente 8000 mg/L esto debido a la liberación de Aluminio al licor mezcla y la fracción volátil correspondiente presento el mismo comportamiento, pero esta era el 50% de los SS.

En cuanto a la electrocoagulación de 10 A/m² los solidos presentaron el mismo comportamiento que la densidad de corriente anterior, aunque su crecimiento no fue tan alto.

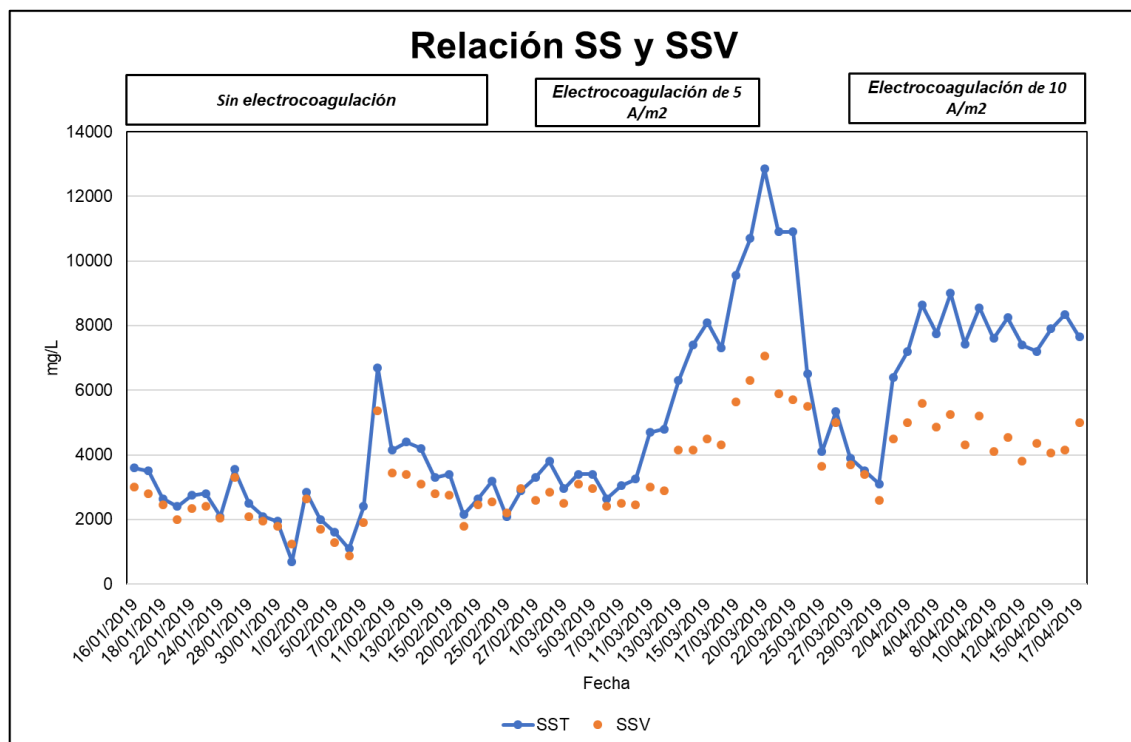


Figura 23. Relación SS y SSV
Fuente: Elaboración Propia

Como se puede apreciar en la figura 24 la viscosidad del licor mezcla está relacionada con los SS. Un valor alto de SS se corresponde con un valor elevado de viscosidad. Sin embargo, esta relación no es proporcional en las distintas fases de operación, puesto que al aplicar una corriente eléctrica los flóculos aumentan de tamaño y la viscosidad tiende a disminuir, como es el caso específico de la densidad de 10 A/m² en la viscosidad bajo mientras que los SS incrementaban.

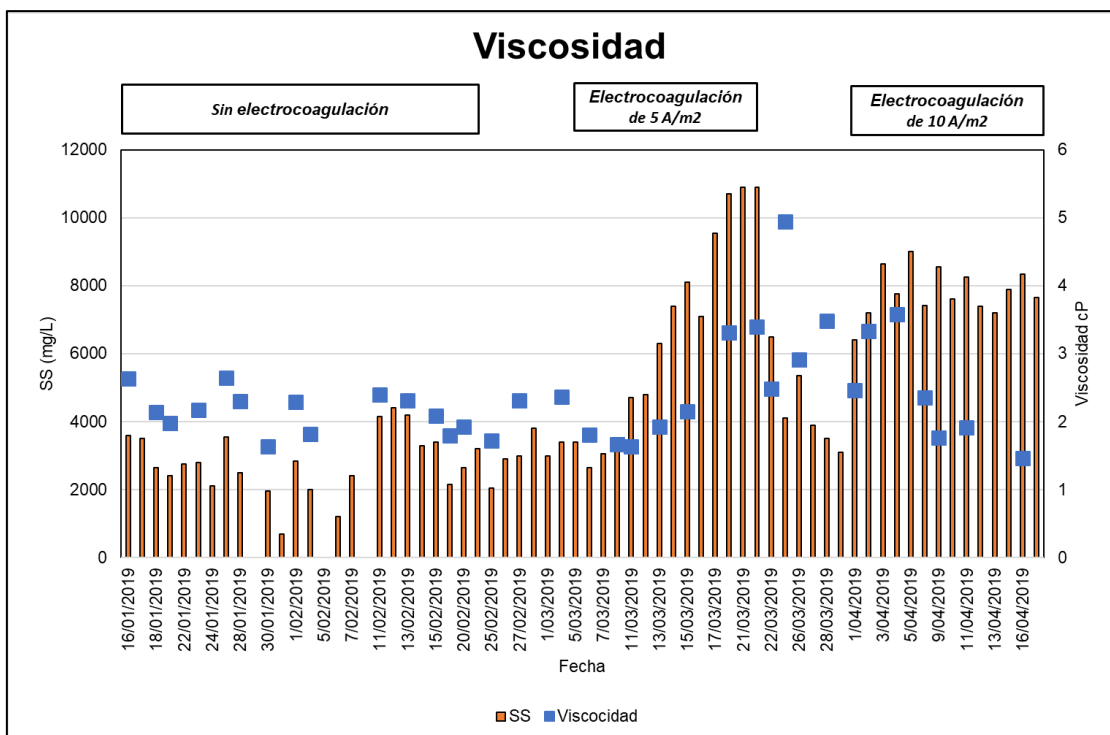


Figura 24. Viscosidad del reactor aerobio
 Fuente: Elaboración Propia

- *Eliminación de materia orgánica*

Los resultados de la eliminación de materia orgánica son expresados mediante el análisis de la DQO. Como se puede ver en la figura 25, los porcentajes de eliminación son bastante altos, mas del 90%; es de resaltar que el reactor UASB remueve aproximadamente 70 al 80% de la materia orgánica demostrando su efectividad como tratamiento secundario en la planta hibrida.

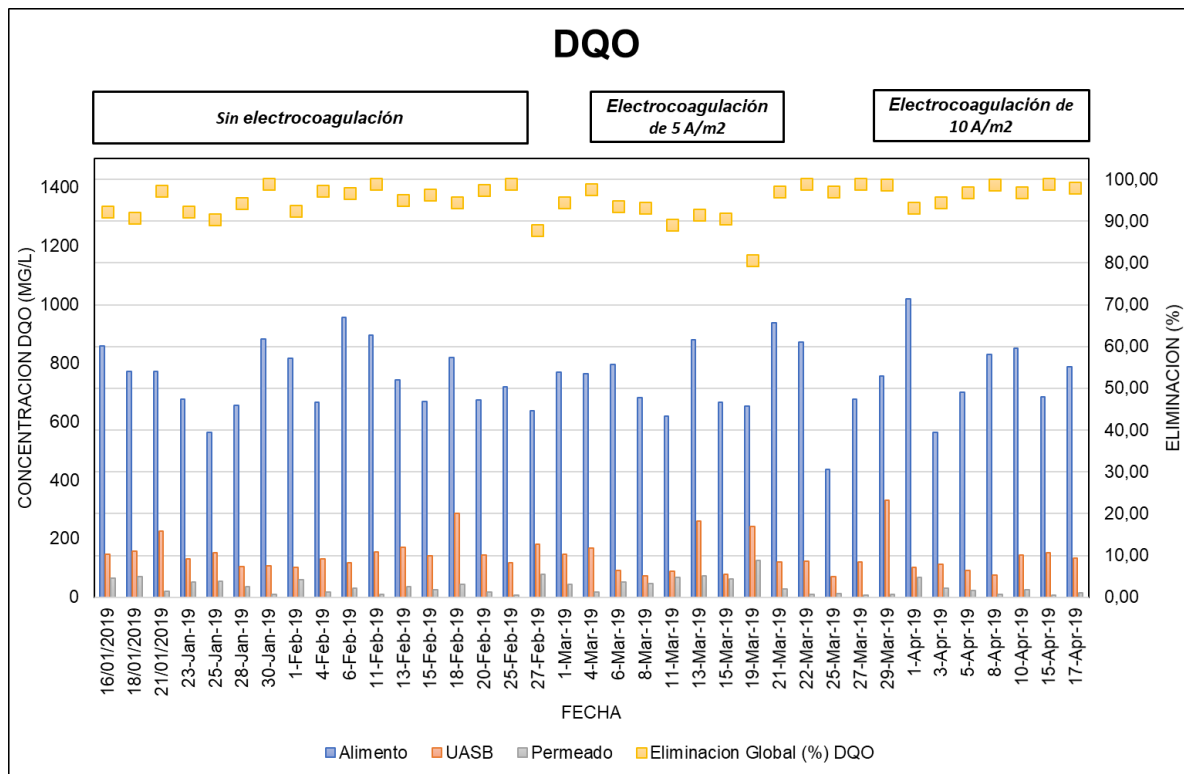


Figura 25. Eliminación de DQO en la planta híbrida
 Fuente: Elaboración Propia

- *Eliminación de nutrientes*

En cuanto a los nutrientes, la eliminación de Nitrógeno Total (figura 26) es baja, ya que el sistema no cuenta con una zona anóxica que permita la desnitrificación, aun así, se registra una eliminación global de alrededor de 33%. La remoción del Fosforo (figura 27) en condiciones normales de operación de la planta se encuentra alrededor del 50 al 60%, aunque esta tiende a ser variable dependiendo del alimento y condiciones operativas de la planta; este parámetro es indicador de la efectividad de la electrocoagulación, ya que en investigaciones de (Bani-Melhem & Elektorowicz, 2011; Hasan et al., 2012; Predolin, 2019) se reportan remociones del orden del 95 al 99% de fosforo en el efluente; en este estudio se documenta que para la electrocoagulación de 5 A/m² y 10 A/m² la remoción de fosforo es del orden del 96 y 99% respectivamente, comprobando que para el sistema SMEBR existe una alta remoción de este nutriente y que es un parámetro/indicador del correcto funcionamiento de la electrocoagulación.

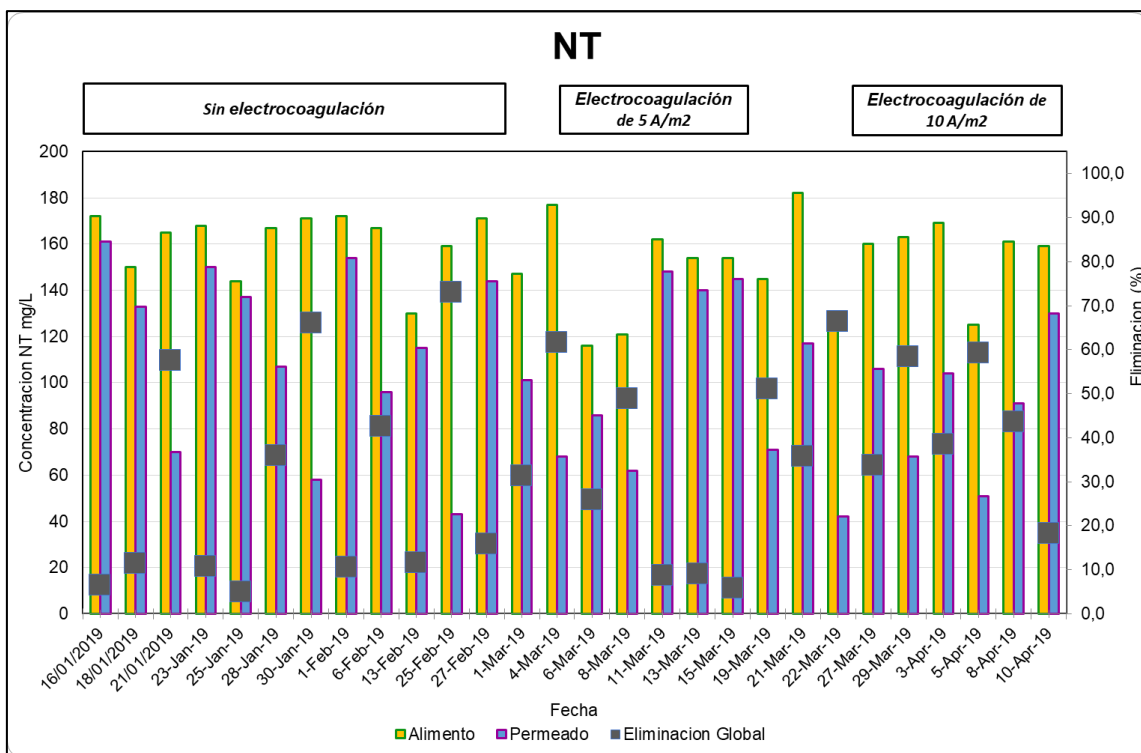


Figura 26. Eliminación de Nitrógeno Total
 Fuente: Elaboración Propia

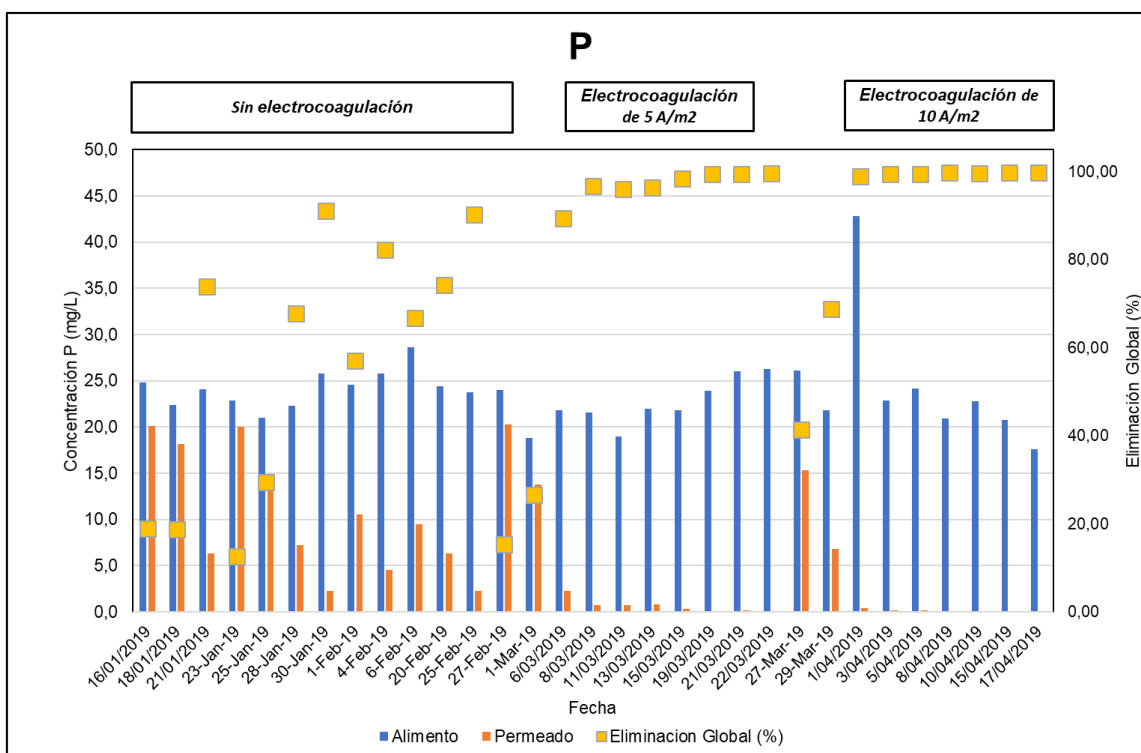
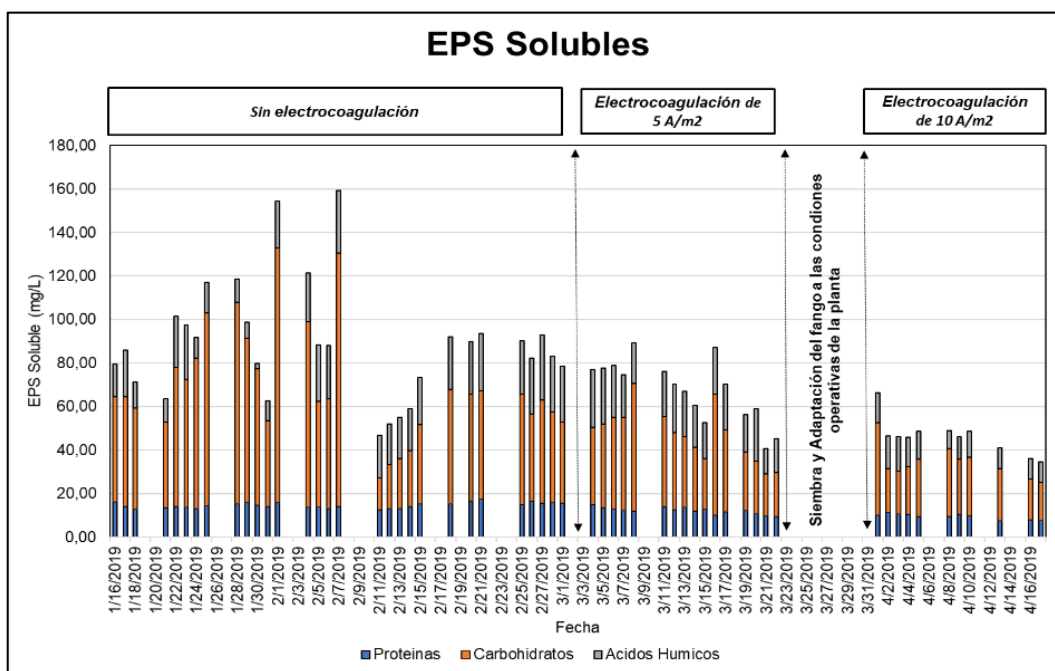


Figura 27. Eliminación de Fosforo Total
 Fuente: Elaboración Propia

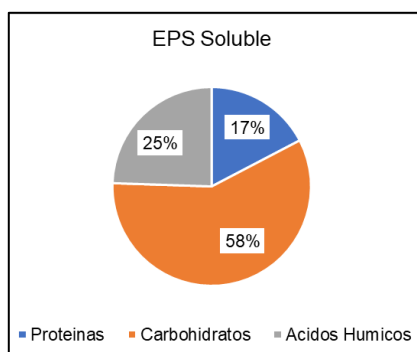
5.2 Determinación de EPS's

- *EPS's Solubles*

La producción de estas sustancias en el reactor en condiciones normales de operación era en promedio de 90 mg/L, para las densidades 5 A/m² y 10 A/m² el promedio fue de 67 y 47 mg/L, lo que confirma que el reactor SMEBR si reduce la producción de sustancias celulares solubles, como se puede ver en la figura 28 (a). Además, en la figura 28 (b), se puede ver la proporción de las sustancias mayoritarias cuantificadas, siendo los carbohidratos con 58% la sustancia con mayor concentración determinada seguida de los ácidos húmicos con 25% y por ultimo las proteínas con 17%



(a)



(b)

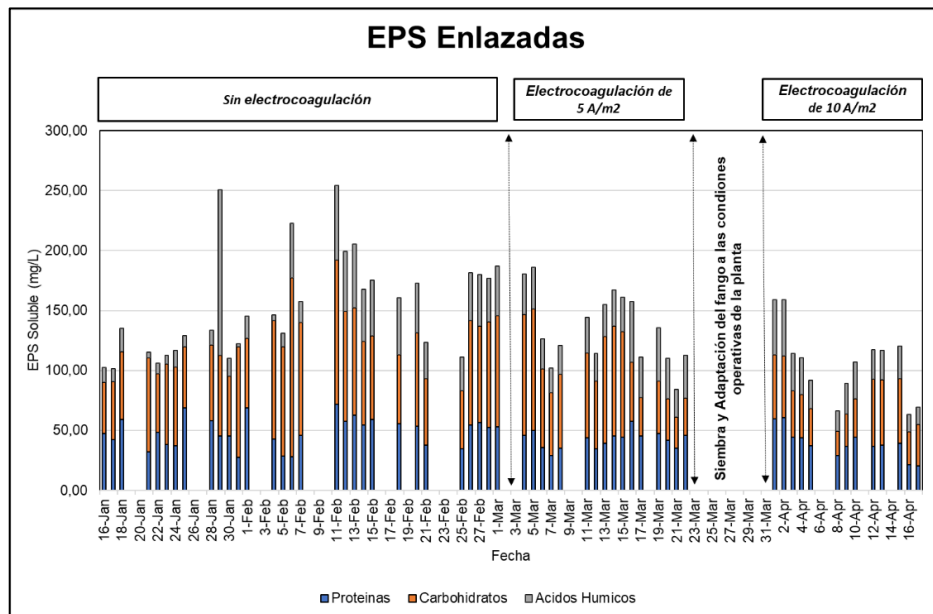
Figura 28. (a) EPS Solubles Totales en cada fase de electrocoagulación, (b) Porcentaje de Proteínas, Carbohidratos y Ácidos Húmicos en las EPS Solubles Totales

Fuente: Elaboración Propia

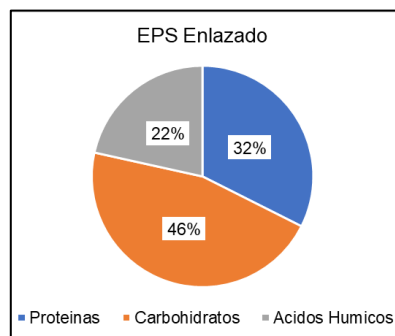
- *EPS's Enlazadas*

Estas sustancias son las identificadas como las que tienen mayor influencia en el ensuciamiento de la membrana en sistemas MBR, las concentraciones de las sustancias mayoritarias son mayores en comparación de las solubles, del orden del 30% más altas; en la figura 29 (a), se puede ver el comportamiento de estas sustancias, en condiciones normales la producción de EPS enlazada fue de 52 mg/gSSV, con intensidades de corriente de 5 A/m² y 10 A/m² fue de 42 y 35 mg/gSSV correspondientemente.

La proporción de las sustancias mayoritarias para las EPS Enlazada es de carbohidratos 46%, proteínas 32% y ácidos húmicos 22%, poniendo en segundo lugar en la producción a las proteínas a diferencia de las EPS Solubles, ver figura 29 (b).



(a)



(b)

Figura 29. EPS Enlazadas Totales en cada fase de electrocoagulación, (b) Porcentaje de Proteínas, Carbohidratos y Ácidos Húmicos en las EPS Enlazadas Totales

Fuente: Elaboración Propia

5.3 Comportamiento de la presión

La presión transmembrana es un parámetro importante a la hora de evaluar la operación de un MBR, a su vez es un indicador del ensuciamiento ya que a mayor presión (en este caso negativa) sea esta, mayor dificultad tiene de filtrar y menor es el rendimiento. Para este estudio se comprobó que la presión transmembrana si disminuye con la aplicación de un sistema como la electrocoagulación, ya que a condiciones normales el diferencial de presión fue de 1,047 kPa/día, con electrocoagulación de 5 A/m² y 10 A/m² registro valores de 0,2800 Y 0,4444 kPa/día.

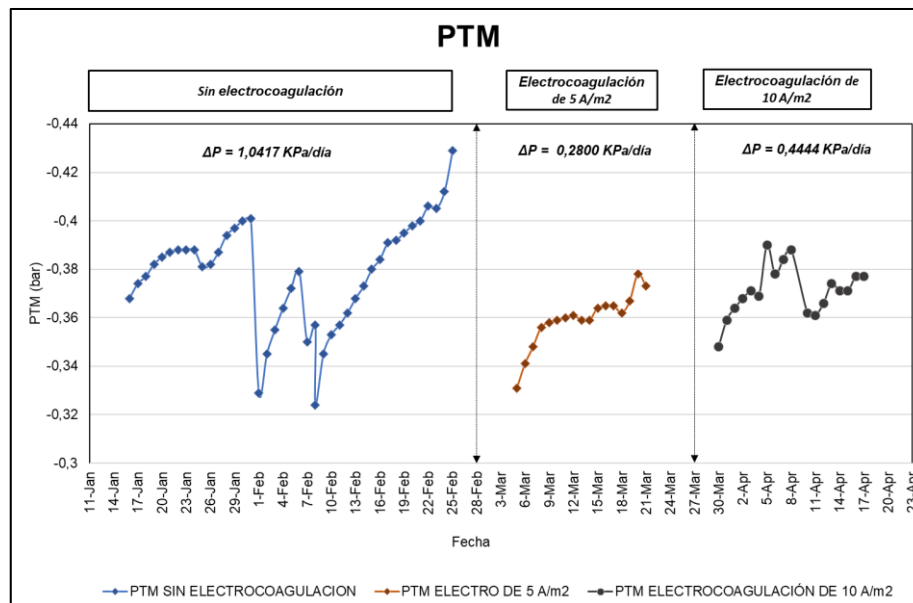


Figura 30. Presión Transmembrana en cada ciclo de electrocoagulación
Fuente: Elaboración Propia

5.4 Aluminio en lodo

El aluminio es un metal que se encuentra en aproximadamente 8% de la corteza terrestre, es uno de los más abundantes en la naturaleza y su dosis letal (DL50) para humanos según la OMS es de 1000 mg/kg, baja en comparación de otros materiales. A nivel mundial no existe una legislación referente a la cantidad de Aluminio en los lodos de las EDAR, para España existe el Real Decreto 1310/1990 referente a la utilización de estos en la agricultura, la cual incorporó al ordenamiento jurídico español la Directiva 86/278/CEE del Consejo, pero en esta no establece niveles máximos permisibles del metal en los lodos.

A medida que se realizaba el ciclo de electrocoagulación, las propiedades visuales del lodo cambiaban, su color y textura, incluso fácil notar que su consistencia no era la misma que un licor mezcla a condiciones normales. Cada vez que se terminaba un ciclo de electrocoagulación, el lodo seco era llevado a análisis por parte de servicios técnicos quienes con ayuda de un equipo ICP-MS realizaban el análisis para la determinación de aluminio en el lodo.

En la tabla 9 se puede ver los resultados del análisis realizado, en primer lugar, se realizó una cuantificación por diferencia de peso del ánodo con el cual se estima la cantidad de aluminio liberado al licor mezcla, con este resultado se evidencia como la intensidad de la

corriente influye directamente en la cantidad de coagulante liberado. En cuanto a valores de concentración y peso de material seco no se encuentran valores referencia para la estimación de concentraciones altas o bajas, aunque por lo general los fangos de depuradora son utilizados como se expreso anteriormente en la agricultura, a pesar de que el aluminio como fertilizante se encuentra englobado dentro del apartado de los oligoelementos microelementos, su concentración es muy baja en las plantas ya que el exceso de aluminio en el suelo puede conducir a problemas nutricionales como: color pálido, crecimiento marchito, tallos débiles y manchas necróticas, además de la reducción de masa radicular y longitud de raíces que conlleva a menor absorción de nutrientes (Cebrián, 2016).

Aluminio liberado en el reactor remanente en fango			
	Peso (g)	Concentración en muestra [ppm]	(mg/kg ms)
Electro de 5 A/m ²	29,8	716,60	114913,41
Electro de 10 A/m ²	72,9	1245,24	201494,22

Tabla 9. Cuantificación de Aluminio después de cada fase de electrocoagulación

Existen otros usos para los lodos provenientes de la depuración, los cuales el CEDEX ⁶ ha realizado estudios, como fabricación de ladrillos, mortero y en general materiales de construcción donde la proporción de aluminio en ellos no cambia las propiedades físicas del material a utilizar.

5.5 Aplicabilidad de la tecnología en Colombia

El tratamiento de aguas residuales en Colombia es reglamentado bajo la Ley 631 de 2015 “Por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones” bien sea domésticas y no domesticas en el país esta regido bajo la, recientemente el Ministerio de Ambiente bajo la resolución 0883 de 2018 “Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas marinas, y se dictan otras disposiciones” actualiza el régimen legal para los vertimientos. Existe igualmente el decreto 50 de 2018 que modifica el artículo 2.2.3.3.4.9. del Decreto 1076 de 2015, referente a los vertimientos al suelo.

El sistema legislativo referente a la gestión de los vertimientos de aguas residuales domesticas y no domesticas en Colombia es muy amplia, aunque en el país no existe una escasez de agua física, si una clara escasez de agua económica e institucional en donde la falta de infraestructura limitada financiera y técnicamente por las instituciones no permite que los tratamientos sean efectivos y la gestión sea ineficiente. La tasa retributiva utilizada como elemento de control de la contaminación, principalmente a cuerpos hídricos superficiales, es un instrumento que financia los tratamientos de los vertimientos, aunque

⁶ <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/30/lodos-de-depuradoras/valorizacion/aplicaciones/137/utilizacion-de-los-lodos.html>

no tan efectiva debido a las pocas depuradoras y los insuficientes controles hacia los vertimientos ilegales.

El país se caracteriza por tener abundantes fuentes de agua, uno de los más importantes es el recurso hídrico superficial, los ríos son una vía de transporte, alimento y organización territorial pero a su vez son a los que les llega la mayoría de vertimientos realizados, el sistema propuesto en la presente investigación es una solución viable para industrias y pequeñas poblaciones, ya que su sistema compacto, la combinación de tratamientos y su efectividad puede remover en términos de materia orgánica más del 90% y de nitrógeno aproximadamente 30%, adicional a esto con la electrocoagulación acoplada al reactor MBR permite la reducción del fosforo en más del 95% y reducir el ensuciamiento de la membrana para que la operación y mantenimiento de las mismas sea más fácil. Por último, cabe resaltar que la membrana es un elemento muy importante, ya que son módulos que permiten la eliminación de virus, bacterias, pesticidas, herbicidas y algunos contaminantes, dependiendo de tamaño de filtración, que por tratamientos convencionales no son fáciles de eliminar de las aguas residuales y garantiza que el proceso de depuración tiene una alta efectividad

Después de realizado el tratamiento, este efluente puede ser vertido de manera segura a un cauce o en adición de un tratamiento de desinfección podría ser reusado por los mismos usuarios, ver figura 31.

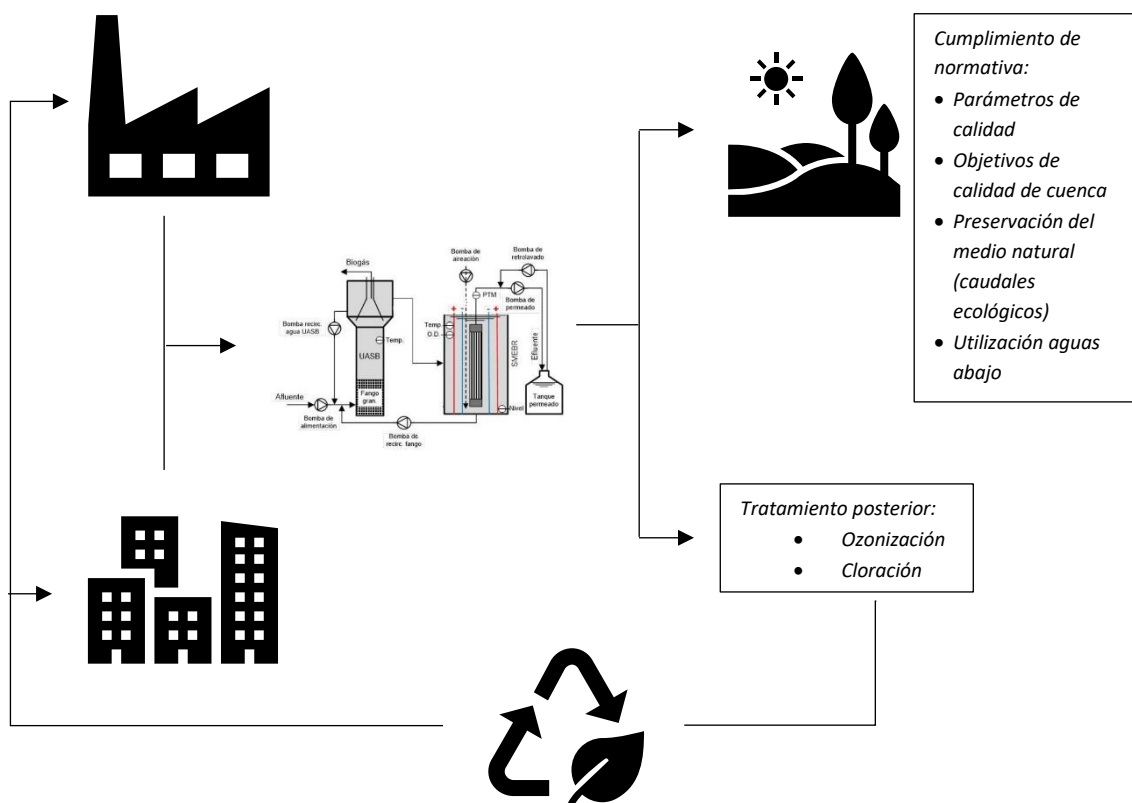


Figura 31. Esquema de implementación de planta híbrida UASB + SMEBR para industrias y pequeñas poblaciones

Fuente: Elaboración Propia

En el país existen pocos proyectos de depuración de aguas con reactores UASB, (Cristina, León, & Fajardo, 2005; Torres, 2012; Vasquez Nuñez, 2015) realizan un resumen con algunas de las aplicaciones al tratamiento a aguas residuales de industrias Colombianas como la cervecera, lixiviados de rellenos sanitarios y a centros poblados como la ciudad de Tunja, Boyacá; este tipo de tecnología resulta muy eficiente en efluentes con alta carga orgánica, en contraste la tecnología MBR solo ha sido aplicada por muy pocas empresas, una de ellas documentada por (Bohorquez & Sarmiento, 2017) en donde la empresa Quala S.A implementa módulos de membranas planas sumergidas para el tratamiento de las aguas residuales producto de la fabricación de perfumería y fármacos, además el relleno sanitario La Pradera en Medellín, Antioquia es pionero en la construcción de un reactor de estas características para el tratamiento de lixiviados ⁷.

6. Conclusiones

- El sistema de tratamiento combinado UASB+SMEBR es una opción de tratamiento eficaz que logra reducir en mas del 90% la materia orgánica, más del 95% el fosforo y un 33% de nitrógeno total además de gracias a su sistema de membrana un efluente fácilmente utilizable en sistemas agrícolas y con apoyo de un sistema de desinfección incluso el consumo potable.
- La reducción de las EPS en sus fases soluble y enlazada con el sistema SMEBR fue del 25% y 19% respectivamente para la densidad de 5 A/m², y con la densidad de 10 A/m² fue de 47 y 32%, siendo así esta ultima la más efectiva en la reducción de estas sustancias celulares.
- En términos del *Ensuciamiento de la membrana*, la densidad de corriente que tuvo una eficiencia mayor fue la de 5 A/m² con una reducción de 73% en la presión registrada en condiciones normales; a diferencia de la intensidad de 10 A/m² que registro solo un 57% de eficiencia en la reducción de la PTM.
- De acuerdo a los resultados obtenidos y la evaluación al sistema global, gracias a la electrocoagulación acoplada al MBR se reducen la producción de EPS's en el licor mezcla, los cuales son la principal causa del ensuciamiento, y a su vez se disminuye el aumento drastico de la PTM el cual afecta operativamente a la membrana.
- En el proceso convencional de tratamiento de agua residual, el fósforo se puede eliminar química y biológicamente. En ambos casos el fósforo insoluble, 10% del fosforo total, es eliminado en la decantación primaria, los ortofosfatos incorporados a las células del fango activado, 15-20% del fosforo total, es eliminado en la decantación y por otra parte mediante la adición de sales de hierro (cloruro férrico), calcio o aluminio se consiguen la precipitación de fosfatos e hidróxidos de fósforo que decantan rápidamente (La & Gandarillas, 2016). Con la utilización de

⁷ <https://www.aguasresiduales.info/revista/noticias/wehrle-construye-en-medellin-colombia-el-primer-mbr-biomembrat-para-tratamiento-de-li-43TY3>

membranas y sistemas SMEBR se puede conseguir la eliminación de estas sustancias en un solo proceso.

- El $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$, producto de la electrocoagulación, es una sustancia amorfa de carácter gelatinoso, la cual posee altas áreas superficiales con propiedades absorbentes y que es propicia para los procesos de adsorción y atracción de las partículas contaminantes; teniendo en cuenta que la electrocoagulación neutraliza y desestabiliza los coloides con carga negativa a través de la generación de iones Al^{3+} , a concentraciones muy altas, reporta (Predolin, 2019) puede dar situaciones de inversión de carga y Re estabilización de coloides.
- El ensuciamiento de la membrana es la principal limitante para la aplicación de los sistemas MBR, con el acoplamiento de la electrocoagulación se reduce considerablemente este aspecto y permite que la operación y mantenimiento de estas sea más fácil, al igual que la vida útil se pueda incrementar reduciendo los costos para el tratamiento de las aguas residuales.

7. Recomendaciones

El sistema se comprobó que funciona a condiciones simuladas de agua residual urbana, debido a que la eficiencia del tratamiento anaerobio del UASB es tan alta, se recomienda realizar pruebas con cargas mas altas de efluentes industriales con el fin de evaluar su rendimiento con este tipo de agua, además de adoptar otro tipo de membrana en el reactor SMEBR ya que la capilar presenta dificultades en la limpieza.

Con el fin de realizar un aprovechamiento de todos los residuos de la planta, en marco de la economía circular, la operación de la electrocoagulación se recomienda que se realice con un material como el hierro o algún otro coagulante que permita su total utilización en procesos agrícolas.

Por otro lado, para la operación de la planta seria de gran interés su funcionamiento con una fuente renovable de energía, como la fotovoltaica, ya que seria un sistema de tratamiento de fácil implementación y mantenimiento en zonas donde existe deficiencia hídrica.

8. Bibliografía

- Adhikari, J. R., & Lohani, S. P. (2019). Design, installation, operation and experimentation of septic tank – UASB wastewater treatment system. *Renewable Energy*, 143, 1406–1415. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.059>
- Arévalo, J., Garralón, G., Plaza, F., Moreno, B., Pérez, J., & Gómez, M. Á. (2009). Wastewater reuse after treatment by tertiary ultrafiltration and a membrane bioreactor (MBR): a comparative study. *Desalination*, 243(1–3), 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.04.013>
- Aslam, M., Ahmad, R., & Kim, J. (2018). Recent developments in biofouling control in

- membrane bioreactors for domestic wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 206(June), 297–315.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.06.004>
- Bagheri, M., & Mirbagheri, S. A. (2018). Critical review of fouling mitigation strategies in membrane bioreactors treating water and wastewater. *Bioresource Technology*, 258(March), 318–334. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.026>
- Bani-Melhem, K., & Elektorowicz, M. (2011). Performance of the submerged membrane electro-bioreactor (SMEBR) with iron electrodes for wastewater treatment and fouling reduction. *Journal of Membrane Science*, 379(1–2), 434–439.
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.06.017>
- Bohorquez, C., & Sarmiento, D. (2017). *ANÁLISIS DEL USO DE BIORREACTORES DE MEMBRANA PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y POSIBLE IMPLEMENTACIÓN EN COLOMBIA*. Universidad Catolica de Colombia.
- Cebrián, A. P. (2016). *Estudio bibliográfico del uso de lodos de depuradora en suelos agrícolas*. Retrieved from
<http://catedramln.unizar.es/files/conferencias/lodos2013/Herrero.pdf>
- Cristina, F., León, M., & Fajardo, E. F. (2005). Estudio de los Reactores UASB Para el Tratamiento De Lixiviados Del Relleno Sanitario La Esmeralda. *Area*.
- Del Hombre Bueno, M. de los A. (2012). Tratamiento de aguas residuales con membrana para obtener efluentes de alta calidad : Estudio a edad de lodo de 30 días .
- Dominguez Chabalina, L. (2010). Análisis del ensuciamiento de membranas en biorreactores de membranas sumergidas escala piloto. Alicante.
- Domínguez, L., Rodríguez, M., & Prats, D. (2010). Effect of different extraction methods on bound EPS from MBR sludges Part II: Influence of extraction methods over molecular weight distribution. *Desalination*, 262(1–3), 106–109.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.06.001>
- Drews, A., & Kraume, M. (2005). Process improvement by application of membrane bioreactors. *Chemical Engineering Research and Design*, 83(3 A), 276–284.
<https://doi.org/10.1205/cherd.04259>
- Giwa, A., Dindi, A., & Kujawa, J. (2019). Membrane bioreactors and electrochemical processes for treatment of wastewaters containing heavy metal ions, organics, micropollutants and dyes: Recent developments. *Journal of Hazardous Materials*, 370(June 2018), 172–195. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.06.025>
- Gómez Silván, C. (2012). *Efecto de las variables de un sistema de bioreactores de membrana sumergida (MBR) sobre la actividad enzimática y la estructura de su comunidad microbiana*. Universidad de Granada. Retrieved from
<http://digibug.ugr.es/bitstream/handle/10481/26402/2180185x.pdf;jsessionid=AF48522513D0C69BC55701A41F29D767?sequence=1>
- Hasan, S. W., Elektorowicz, M., & Oleszkiewicz, J. A. (2012). Correlations between trans-membrane pressure (TMP) and sludge properties in submerged membrane electro-bioreactor (SMEBR) and conventional membrane bioreactor (MBR). *Bioresource Technology*, 120, 199–205. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.043>
- Hua, L. C., Huang, C., Su, Y. C., Nguyen, T. N. P., & Chen, P. C. (2015). Effects of electro-coagulation on fouling mitigation and sludge characteristics in a coagulation-

- assisted membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*, 495, 29–36.
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.07.062>
- Ibeid, S., Elektorowicz, M., & Oleszkiewicz, J. A. (2015). Electro-conditioning of activated sludge in a membrane electro-bioreactor for improved dewatering and reduced membrane fouling. *Journal of Membrane Science*, 494, 136–142.
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.07.051>
- Keeley, J., Jarvis, P., Smith, A. D., & Judd, S. J. (2016). Coagulant recovery and reuse for drinking water treatment. *Water Research*, 88, 502–509.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.10.038>
- La, J., & Gandarillas, I. (2016). Módulo Gestión de Aguas Residuales y Reutilización Máster en Ingeniería y Gestión del Agua.
- Le-Clech, P., Chen, V., & Fane, T. A. G. (2006). Fouling in membrane bioreactors used in wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*, 284(1–2), 17–53.
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.08.019>
- Lopez, A. (2012). *Diseño de un Biorreactor De Membranas Sumergidas a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales*. Universidad de Alicante.
- López, J., Fornés, J., Ramos, G., & Villarroya, F. (2009). *Las aguas subterráneas Un recurso natural del subsuelo*. Instituto Geológico y Minero de España. Retrieved from [https://www.fundacionbotin.org/89dguuytdfr276ed.../educacion ambiental.pdf](https://www.fundacionbotin.org/89dguuytdfr276ed.../educacion%20ambiental.pdf)
- Mahmoud, N., Zeeman, G., Gijzen, H., & Lettinga, G. (2004). Anaerobic sewage treatment in a one-stage UASB reactor and a combined UASB-Digester system. *Water Research*, 38(9), 2348–2358. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.01.041>
- Martos Parra, M. (2016). *Estudio en planta piloto de la microestructura y de la biomasa del fango aerobio / anaerobio en diferentes condiciones operacionales* Máster Universitario en Gestión Sostenible y. Univesidad del Alicante.
- Mendes Predolin, L. (2015). *ESTUDIO DE UN SISTEMA HÍBRIDO UASB+MBR PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS*. Universidad de Alicante.
- Meng, F., Chae, S., Drews, A., Kraume, M., & Shin, H. (2009). Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): Membrane fouling and membrane material. *Water Research*, 43(6), 1489–1512. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.12.044>
- Meng, F., Zhang, S., Oh, Y., Zhou, Z., Shin, H. S., & Chae, S. R. (2017). Fouling in membrane bioreactors: An updated review. *Water Research*, 114, 151–180.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.006>
- Molinos-Senante, M., Hernández Sancho, F., & Sala Garrido, R. (2012). Estado actual y evolución del saneamiento y la depuración de aguas residuales en el contexto nacional e internacional. *Anales de Geografía de La Universidad Complutense*, 32(1), 69–89. https://doi.org/10.5209/rev_AGUC.2012.v32.n1.39309
- Mora Cabrera, K. V. (2019). OPERACIÓN DE PLANTA PILOTO HIBRIDA UASB + SMEBR PARA GENERACIÓN DE EFLUENTES DE CALIDAD Y REDUCCIÓN DE ENSUCIAMIENTO DE MEMBRANA. In J. Melgarejo (Ed.), *Congreso Nacional del Agua Orihuela (2019)*. Orihuela, Alicante.
- Moya Llamas, M. J. (2018). *Efecto de la carga orgánica en la eliminación de microcontaminantes, materia orgánica y nutrientes en un sistema UASB-MBR escala*

- piloto para el tratamiento de aguas residuales de tipo urbano*. University of Alicante.
- Navarro, F. M. (2008). *Tratamiento de Aguas Residuales Industriales Mediante Electrocoagulación y Coagulación Convencional*.
- Prats Rico, D. (2019). *Aplicación de los procesos de membrana al tratamiento de aguas*. Alicante.
- Predolin, L. M. (2019). Tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación acoplada a un MBR para minimizar el ensuciamiento de la membrana y obtener efluentes de alta. Retrieved from <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/90307>
- Restrepo, A., Arango, Á., & Gardes, L. (2006). Electrocoagulation: Challenges and opportunities in water treatment. *Produccion + Limpia*, 1(2), 20. Retrieved from http://repository.lasallista.edu.co/dspace/bitstream/10567/514/1/pl_v1n2_58-77_electrocoagulacion.pdf
- Rosenberger, S., Evenblij, H., Te Poele, S., Wintgens, T., & Laabs, C. (2005). The importance of liquid phase analyses to understand fouling in membrane assisted activated sludge processes - Six case studies of different European research groups. *Journal of Membrane Science*, 263(1–2), 113–126. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.04.010>
- Shi, Y., Huang, J., Zeng, G., Gu, Y., Chen, Y., Hu, Y., ... Shi, L. (2017). Exploiting extracellular polymeric substances (EPS) controlling strategies for performance enhancement of biological wastewater treatments: An overview. *Chemosphere*, 180, 396–411. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.04.042>
- Torres, P. (2012). Perspectivas Del Tratamiento Anaerobio De Aguas Residuales Domésticas En Países En Desarrollo. *Revista ETA*, (18), 115–129. <https://doi.org/10.1533/tepr>
- Trussel, R. S., Merlo, R. ., Hermanowicz, S. ., & Jenkins, D. (2007). The effect of organic loading on process performance and membrane fouling in a submerged membrane bioreactor trating municipal wastewater. *Water R*, 40, 2675–2683.
- Ures, P. (2015). Ft-Bio-010 Biorreactores De Membrana (Brm) Serie: Tratamientos Secundarios Biorreactores De Membrana (Ft-Bio-010). Retrieved from <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Biorreactores+de+membrana+%28BRM%29.pdf/5eaf2ead-d155-2a7f-d72a-63ff5548ba5f>
- Vásquez, E. (2015). Estudio de biorreactor de membrana para el tratamiento de aguas residuales urbanas, 99. Retrieved from <https://iuaca.ua.es/es/master-agua/documentos/-gestadm/trabajos-fin-de-master/tfm09/tfm09-edgardo-vasquez-rodriguez.pdf>
- Vasquez Nuñez, G. D. C. E. (2015). Panorama del tratamiento de aguas residuales con tecnología anaerobia en la Costa Atlantica Colombiana, 152. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/49437/>

ANEXOS

Anexo 1. Proceso de extracción y determinación de EPS (tomado y adaptado).

1. Determinación de las sustancias poliméricas extracelulares

Se determina la concentración de carbohidratos, proteínas y ácidos húmicos presentes en las sustancias poliméricas extracelulares segregadas por los microorganismos presentes en el MBR: EPS solubles y EPS enlazados.

El proceso consta de dos etapas:

- a) Extracción de los EPS solubles y los EPS enlazados.
- b) Determinación de la concentración de carbohidratos, proteínas y ácidos húmicos presentes en cada una de las fases separadas.

1.1 Extracción de los EPS solubles y los EPS enlazados

a) Centrifugación para la separación de los EPS solubles.

- Se cogen 150 ml de muestra del licor de mezcla a ensayar (a), repartiendo éstos entre tres viales de centrifugación de EPS (50 ml en cada vial).
- Centrifugadora SIGMA 4K10 (b):



(a) Muestra de MBR



(b) Fotografía de centrifuga

Se colocan los tubos en la centrifugadora distribuyendo uniformemente el peso (si hay tres tubos, se recomienda introducir uno más con agua). Programa: 15 min a 4000 gravedades (aprox. 7400 r.p.m.) y T= 4 °C.

- Se coloca el sobrenadante en un vaso correctamente etiquetado y se introduce en el frigorífico hasta su posterior análisis.
- Con el pellet de fango obtenido se pasa a la siguiente etapa.

b) Extracción de los EPS enlazados mediante la utilización de resina catiónica.

- Se mezcla el pellet de fango obtenido tras la centrifugación anterior con una solución tampón de fosfato consistente en Na₃PO₄ 2 mM, NaH₂PO₄ 4mM, NaCl 9 mM y KCl 1 mM a pH=7, hasta obtener de nuevo un volumen

de muestra de 150 ml.

- A la mezcla anterior se le añade la cantidad de resina catiónica (c) necesaria (resina catiónica Dowex 50 x 8, 20-50 mesh en forma de Na⁺).

$$m_{\text{resina}} \text{ (g)} = C_{\text{MLSS}} \text{ (gSSv} \cdot \text{L}^{-1}) \cdot \frac{70 \text{ g resina}}{\text{g SSV}} \cdot V_{\text{muestra}} \text{ (L)}$$

- La nueva mezcla se mantiene en agitación durante 16 horas a 900 r.p.m (d)



(c) Resina Catiónica



(d) Fotografía de placa agitadora

- Centrifugación: extracción del sobrenadante con los EPS enlazados y eliminación de la resina/lodo.

Programa: 1 min a 4000 gravedades (aprox. 7400 r.p.m.) y T= 4 °C.

Los EPS enlazados se encuentran en el sobrenadante, el cual se extrae y se introduce en otro vial. Se elimina la resina/lodo.

- Centrifugación: extracción de los EPS enlazados, eliminación de los flóculos remanentes de lodo.

Programa: 15 min a 4000 gravedades (aprox. 7400 r.p.m.) y T= 4 °C.

Se guarda el sobrenadante obtenido etiquetándolo adecuadamente como EPS enlazados. No deben quedar sólidos en éste.

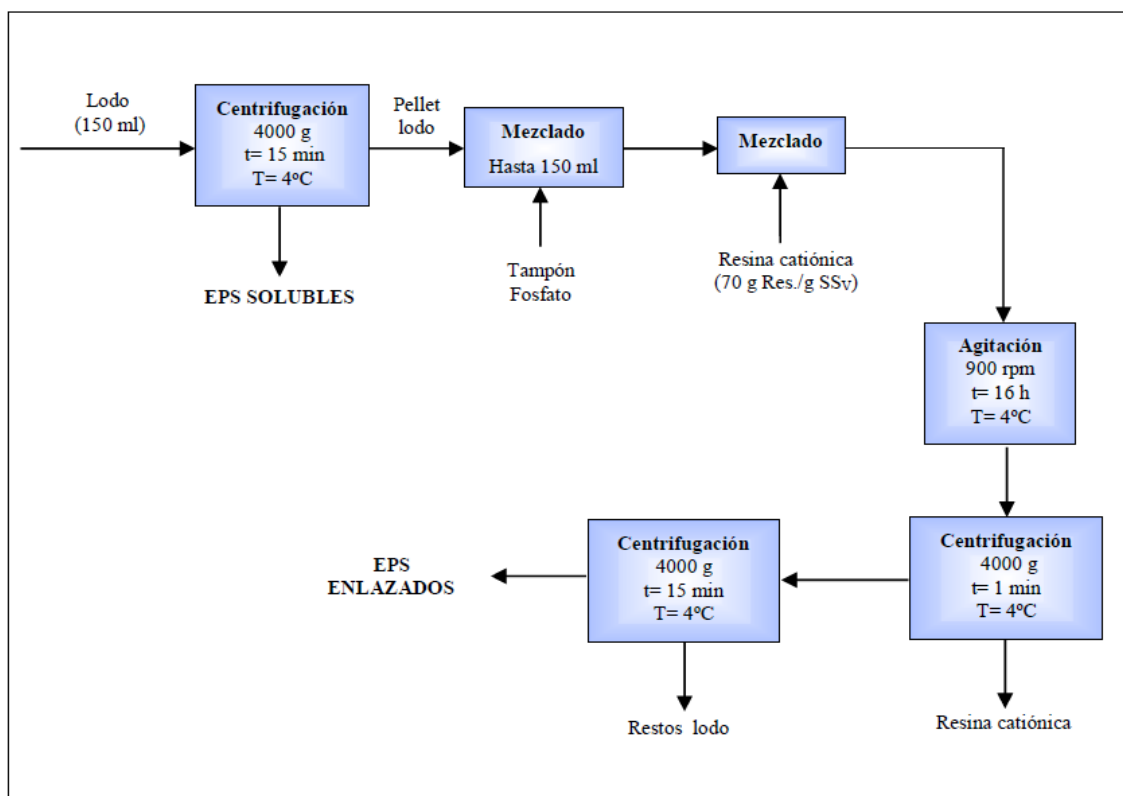


Figura 1. Extracción de EPS solubles y enlazados.

Preparación del tampón fosfato:

- Se prepara una solución tampón de fosfato consistente en Na_3PO_4 2 mM, NaH_2PO_4 4mM, NaCl 9 mM y KCl 1 mM a pH= 7. Para ello se pesan las siguientes sustancias para un V= 2 L (la solución se puede guardar durante unos meses sin que se degrade):

Tabla 1. Preparación del tampón fosfato.

Compuesto	Cdisolución / M	mcompuesto / g
Na_3PO_4	0,002	0,656
NaH_2PO_4	0,004	0,960
NaCl	0,009	1,052
KCl	0,001	0,149

1.2 Determinación de la concentración de carbohidratos, proteínas y ácidos húmicos presentes en cada una de las fases separadas

Consideraciones previas:

- Cada muestra se ensaya por duplicado.
- Los ensayos se realizan también sobre los patrones, para la obtención de la curva de calibrado.
- Se toma una muestra de agua bidestilada como blanco.

- A veces es preferible diluir las muestras de EPS enlazados a 1:2 o 1:4 con el fin de que la concentración esté dentro del rango de los patrones.

Funcionamiento del espectrofotómetro Shimadzu (UV-1601)
(e):

Seleccionar método: Photometric method (1).

Introducir blanco: autocero (para iniciar el resto de las muestras).

Introducir las muestras de menor a mayor concentración y pulsar START para que mida. Para cambiar la longitud de onda presionar RETURN y pulsar GO TO. Indicar el valor de la longitud de onda deseada.



(e) Fotografía del equipo

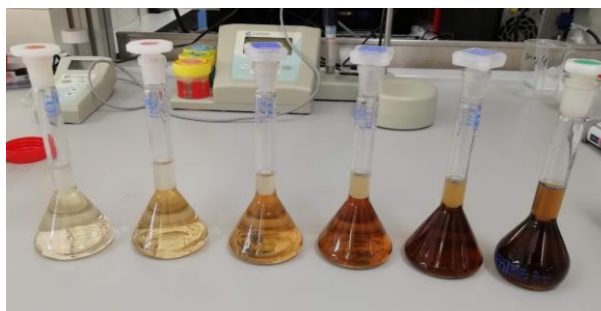
a) Determinación de la concentración de ácidos húmicos

Procedimiento: método colorimétrico de Frolund.

- Se coloca 1 ml de muestra (EPS enlazado y/o EPS soluble) en un tubo de ensayo identificado.
- A cada muestra se le adiciona 1,4 mL del reactivo 3 y se agita bien.
- Posteriormente se le adiciona 0,2 ml del reactivo 4 (da color) y se agita, dejando reposar la muestra durante 45 min.
- Lectura de la concentración con el espectrofotómetro Shimadzu (UV-1601) a $\lambda = 750 \text{ nm}$.

Preparación de los patrones:

- Para la obtención de la recta de calibrado se preparan patrones de distinta concentración de ácidos húmicos: 25, 50, 100, 200 y 300 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$, partiendo de una solución madre de Sigma Aldrich de 400 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$. (f)
- La solución madre de ácidos húmicos se guarda en el frigorífico entre 2 y 10° C durante un máximo de 3 meses; el resto de patrones se desechan tras su utilización.



(f) Fotografía de patrones para ácidos húmicos

Tabla 2. Preparación de la solución madre de ácidos húmicos.

Cmadre mg·l ⁻¹	Vdisolución / ml	Sal sódica de ácido húmico / g
400	500	0,2

Tabla 3. Preparación de las disoluciones patrón de ácidos húmicos a partir de la disolución madre.

Vdisolución / ml	Cdisolución mg·l ⁻¹	Vdis. madre / ml
50	25	3,125
50	50	6,25
50	100	12,5
50	200	25
50	300	37,5

Preparación de los reactivos:

- Reactivo 1: 143 mM de NaOH y 270 mM de Na₂CO₃.
 Pesar 0,57 de NaOH y 2,86 g de Na₂CO₃ y disolver en agua bidestilada hasta 100 ml.
- Reactivo 2: 124 mM de Na-tartrate.
 Pesar 2,4 g de Na-tartrate·2 H₂O y disolver en agua bidestilada hasta 100 ml.
- Reactivo 3: Mezcla de 99 ml del Reactivo 1 con 1 ml del Reactivo 2.
- Reactivo 4: Poner 20,8 ml del reactivo Folin Ciocalteu en un matraz de 25 ml y enrasar con agua bidestilada.
- *NOTA:* Soluciones estables durante seis meses a temperatura ambiente.

b) Determinación de la concentración de carbohidratos

Procedimiento: método colorimétrico del fenol-ácido sulfúrico.

- Se colocan 2 ml de muestra (EPS enlazado y/o EPS soluble) en un tubo de ensayo identificado.
- A cada muestra se le adicionan 50 mL de fenol (80% en peso) y 5 mL de H₂SO₄ (95-98%, para análisis).
- Se agita cada muestra vigorosamente, dejándola reposar durante 10 min.
- Posteriormente, se colocan los tubos de ensayo de las muestras en un baño de agua a 25-30°C durante 10-20 min.
- Lectura de la concentración con el espectrofotómetro Shimadzu (UV-1601) a $\lambda = 485$ nm.

Preparación de los patrones:

- Para la obtención de la recta de calibrado se preparan patrones de distinta concentración de glucosa: 25, 50, 75, 100 y 150 mg·l⁻¹.
- Las soluciones de glucosa se preparan el día del análisis y posteriormente se desechan. Se parte de una solución de 150 mg·l⁻¹ de glucosa.

Tabla 4. Preparación de la solución madre de glucosa.

Cmadre / mg·l ⁻¹	Vdisolución / ml	Glucosa / g
150	1000	0,150

Tabla 5. Preparación de las disoluciones patrón de glucosa a partir de la disolución madre.

Vdisolución / ml	Cdisolución / mg·l ⁻¹	Vdis. madre / ml
50	25	8,33
50	50	16,67
50	75	25,00
50	100	33,33

Preparación de los reactivos:

- Disolución de fenol al 80% en peso.

Se pesan 80 g de fenol y se le añade agua hasta un peso total de 100 g.

Se agita la solución hasta que esté líquida y se guarda en el frigorífico en un matraz.

c) Determinación de la concentración de proteínas

Procedimiento: método colorimétrico de Lowry.

- Se coloca 1 ml de muestra (EPS enlazado y/o EPS soluble) en un tubo de ensayo identificado.
- A cada muestra se le adiciona 1 ml del reactivo Lowry, agitándola y dejándola reposar durante 20 min.
- Posteriormente se le adiciona 0,5 ml del reactivo Folin-Ciocalteu. Se agita y se deja reposar 30 min hasta adquisición del color.
- Lectura de la concentración con el espectrofotómetro Shimadzu (UV-1601) a $\lambda = 650$ nm.

Preparación de los patrones:

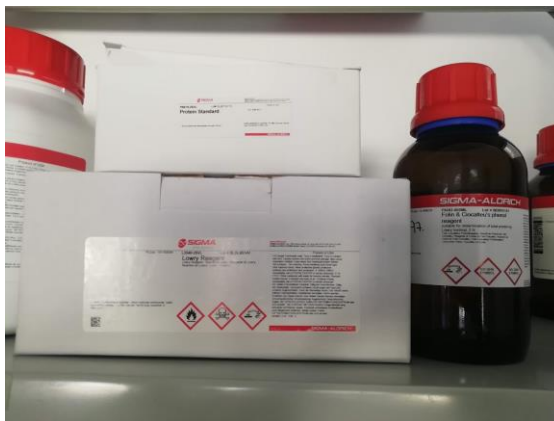
- El kit de proteínas utilizado P-5619 contiene un bote a vacío con el patrón de proteínas de concentración $400 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$. (g)
Se abre el bote cuidadosamente ya que está a vacío y se le añaden 5 ml de agua bidestilada con cuidado (patrón madre). Se mantiene en el frigorífico.
- Para la obtención de la recta de calibrado se preparan patrones de distinta concentración de proteínas: 50, 100, 200, 300 y $400 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$. Éstos se preparan directamente sobre el tubo de ensayo: $V_{\text{total}} = 1 \text{ ml}$.

Tabla 6. Preparación de las disoluciones patrón de proteínas a partir de la disolución madre.

V disolución / ml	Cdisolución / $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$	V dis. madre / ml	V agua bidestilada. / ml
1	50	0,125	0,875
1	100	0,250	0,750
1	200	0,500	0,500
1	300	0,750	0,250
1	400	1,000	0,000

Preparación de los reactivos (h):

- Reactivo de Lowry.
Se prepara siguiendo las indicaciones del kit.
- Reactivo de Folin-Ciocalteu.
Se prepara siguiendo las indicaciones del kit.



(g) estándar de proteínas (h) reactivo lowry y Folin-Ciocalteu